



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LUANA LAVAGNOLI MOREIRA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS E DE
DESEMPENHO DO MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT*
TOOLS (SWAT) NA ESTIMATIVA DE VAZÕES MÉDIAS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

VITÓRIA

2017

LUANA LAVAGNOLI MOREIRA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS E DE
DESEMPENHO DO MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT*
TOOLS (SWAT) NA ESTIMATIVA DE VAZÕES MÉDIAS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rigo.

VITÓRIA

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M838a Moreira, Luana Lavagnoli, 1990-
Análise de sensibilidade de parâmetros e de desempenho do
modelo Soil and Water Assessment Tools (SWAT) na estimativa
de vazões médias em bacias hidrográficas / Luana Lavagnoli
Moreira. – 2017.
109 f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Análise de sensibilidade. 2. Calibração. 3. Bacias
hidrográficas. 4. Vazões naturais. 5. Modelo SWAT. I. Rigo,
Daniel. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. III. Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

“Análise de sensibilidade de parâmetros e de desempenho do modelo Soil and Water Assessment Tools (SWAT) na estimativa de vazões médias em bacias hidrográficas”.

LUANA LAVAGNOLI MOREIRA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Rigo
Orientador - DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Antonio Sergio Ferreira Mendonça
Examinador Interno - DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio
Examinador Externo – CCA/UFES

Coordenador do PPGEA: Prof. Dr. Diogo Costa Buarque
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória, ES, 19 de abril de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, criador de tudo que é, pelo aprendizado constante.

Aos meus pais, Gilmar e Cida, por serem minha base, incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador Daniel Rigo pela confiança no meu trabalho e por todos os auxílios durante essa jornada.

À Camila Guimarães que foi minha salvação neste mestrado por ter sido minha professora de modelagem com SWAT e SWAT-CUP.

Ao professor Antônio Sergio por todas as sugestões e auxílios prestados, assim como os professores Edmilson e Edumar pelo apoio dado às questões administrativas do mestrado.

À minha amiga Joseline que vem me ajudando ao longo dos anos com ensinamentos técnicos, acadêmicos, emocionais, motivacionais, etc.

Ao José Monteiro e Karim Abbaspour por sanarem inúmeras dúvidas com relação ao processo de calibração no SWAT-CUP.

Ao Vinicius De Martin pela oportunidade em realizar estágio de docência em sua disciplina. E aos meus primeiros alunos Alinie, Barbara, Brunna, Chaila, Gabriela, Juanna, Thiago Mordente e Thiago Gomes da minha primeira disciplina (Modelagem em SWAT), gratidão por essa oportunidade.

À Selenia Gomes por todas as dicas acadêmicas e em TI repassadas.

Aos meus eternos amigos da Ambiental, que ao longo desses anos estiveram presentes, compartilhando apertos e alegrias. A todos aqueles que estiveram na torcida pela conclusão dessa conquista.

À minha amiga Joana pelo convívio e apoio diário.

A toda equipe do PPGEA, assim como o corpo discente.

À CAPES e ao CNPQ pela concessão das bolsas de estudos.

Gratidão, gratidão, gratidão!

“Somente a viagem está escrita, e não o destino. O futuro não está escrito em uma pedra, ele muda constantemente com as escolhas que fazemos.”

Vianna Stibal

RESUMO

A modelagem de vazões médias vem acompanhada de incertezas relacionadas aos dados de entrada climatológicos e às características fisiográficas da bacia hidrográfica. A obtenção de vazões representativas da área de estudo requer o ajuste destas com os dados observados. Uma calibração satisfatória depende de uma série de fatores que interferem neste processo. Dessa forma, procurou-se avaliar a eficácia da calibração das vazões estimadas pelo modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) em uma bacia hidrográfica rural localizada no sudeste do estado do Espírito Santo, variando parâmetros de calibração, estações de monitoramento de vazões, tamanhos das séries históricas e número de sub-bacias envolvidas no processo, além disso foram verificados o processo de análise de sensibilidade dos parâmetros de calibração e a influência dos mesmos e dos dados de entrada nas estimativas de vazões. Os resultados da análise de sensibilidade identificaram que a maioria dos parâmetros mais sensíveis da área de estudo foram os mesmos observados em vários trabalhos realizados no Brasil e na região sudeste do país. Além disso, houve variação nos parâmetros mais sensíveis dependendo do tipo de análise realizada. As vazões médias simuladas pelo SWAT foram superestimadas quando comparadas com os dados observados. Por esse motivo foi necessário calibração e análise da influência dos dados de entrada nesses resultados. Os testes de calibração foram realizados pelo programa SWAT-CUP e a eficácia de cada teste foi avaliada estatisticamente pelo Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), Tendência Percentual (PBIAS) e Erro Quadrado Médio (EQM). Os testes de calibração com série longa de dados observados (29 anos) de duas estações fluviométricas não geraram resultados satisfatórios. O melhor resultado consistiu em variar todos os parâmetros de calibração em todas as sub-bacias da área de estudo. Esse teste foi realizado com uma série histórica de 3 anos, e então, foi possível obter uma calibração satisfatória com valores de COE iguais a 0,53 e 0,50, PBIAS iguais a 6,60 e 20,70 e EQM iguais a 0,72 e 0,69 para cada estação fluviométrica, respectivamente. Verifica-se que o processo de calibração é um ajuste fino, portanto, a elevada superestimação dos dados simulados dificulta a calibração, isso pode ser associado à qualidade dos dados de entrada de uso do solo, clima, pedologia e espacialização das estações climáticas na bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade. Calibração. Produção de água. SWAT. Vazões.

ABSTRACT

Flows modelling is presents by uncertainties related to climatological input data and watershed physiographic characteristics. In order to get representative flows simulated from the study area it is necessary adjust these flows to observed data. A satisfactory calibration depends on some factors that interfere in this process. Thus, the efficacy of the calibration of the flows estimated by the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model in rural watershed in the southeast of Espírito Santo state was evaluated, by changing calibration parameters, fluviometric stations, historical series and number of sub-basins involved in the process. In additionally there were verified the process of sensitivity analysis of calibration parameters and the influence of input data in the estimation of the flow rates. The results of the sensitivity analysis identified that most sensitive parameters for the study area are the same found in other studies carried out in Brazil and in its Southeast region. There were differences in the most sensitive parameters found for each type of analysis performed. The mean flows obtained by the SWAT were overestimated when compared to the observed data. Hence, it was necessary to calibrate and analyze the influence of the input data on the results. The calibration tests were performed by the SWAT-CUP program and the efficacy of each test was statistically evaluated by Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (COE), Trend Percentage (PBIAS) and Mean Square Error (EQM). Calibration tests for observed series flow (29 years) from two fluviometric stations did not generate satisfactory results. The best result was obtained by changing all the calibration parameters for all sub-basins in the study area. This test was applied to short flows series (3 years) and it was possible to obtain a satisfactory calibration with COE values equal to 0.53 and 0.50, PBIAS equal to 6.60 and 20.70 and EQM equal to 0.72 and 0.69 for each fluviometric station, respectively. It is verified that the calibration process is a fine adjustment, therefore, the high overestimation simulated data makes calibration difficult, this can be associated with the quality of the input data of soil, climate, pedology and spatialization of the climatic stations in the basin.

Key words: Calibration. Flows. Sensitivity analysis. SWAT. Water production.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - CN para áreas agrícolas.....	32
Tabela 2 - CN para áreas urbanas.	33
Tabela 3 - Valores do coeficiente de Manning para escoamento superficial.	34
Tabela 4 - Valores do coeficiente de Manning para escoamento no canal.....	35
Tabela 5 - Valores dos coeficientes com relação a performance da calibração para modelagem de produção de água.....	45
Tabela 6 - Pedologia da bacia hidrográfica do rio Jucu	50
Tabela 7 - Classificação textural e condutividade hidráulica.....	54
Tabela 8 - Valores de CN para uso do solo da região de estudo	57
Tabela 9 - Dados climáticos de entrada do modelo SWAT.....	59
Tabela 10 - Relação entre as alturas pluviométricas.	61
Tabela 11 - Parâmetros da análise de sensibilidade relacionados à produção de água.	64
Tabela 12 - Classificação da sensibilidade dos parâmetros.	71
Tabela 13 - Parâmetros de cada classe de solo da bacia hidrográfica do rio Jucu.	75
Tabela 14 - Valores das funções objetivo do primeiro teste de calibração.	81
Tabela 15 - Valores das funções objetivo do segundo teste de calibração.	84
Tabela 16 - Valores das funções objetivo do terceiro teste de calibração.	85
Tabela 17 - Valores das funções objetivo do quarto teste de calibração.	88
Tabela 18 - Valores das funções objetivo do quinto teste de calibração.	90
Tabela 19 - Tabela resumo dos valores de COE para cada teste de calibração.....	90
Tabela 20 - Valores das funções objetivo do sexto teste de calibração.	92
Tabela 21 - Valores dos parâmetros da calibração satisfatória das vazões estimadas. ...	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de retenção de água no solo.....	21
Figura 2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Jucu.	48
Figura 3 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do rio Jucu.	50
Figura 4 - Mapa de pedologia da bacia hidrográfica do rio Jucu.	51
Figura 5 - Triângulo textural do solo.	54
Figura 6 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Jucu.	55
Figura 7 - Percentuais de área de cada uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Jucu.....	56
Figura 8 - Mapa de localização das estações climáticas na bacia hidrográfica do rio Jucu.	59
Figura 9 - Localização das estações fluviométricas.....	62
Figura 10 - Fluxograma de quatro testes de calibração usando série histórica longa.	67
Figura 11 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o primeiro teste.	69
Figura 12 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o segundo teste.	70
Figura 13 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o terceiro teste.	70
Figura 14 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o quarto teste.	71
Figura 15 - Sub-bacias da região de estudo e localização das estações de vazão e climáticas.....	74
Figura 16 - Vazões (estimadas e monitoradas) e precipitações da sub-bacia 57.....	77
Figura 17 - Vazões (estimadas e monitoradas) e precipitações da sub-bacia 128.....	77
Figura 18 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o primeiro teste de calibração.....	81
Figura 19 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o primeiro teste de calibração.....	81
Figura 20 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o segundo teste de calibração.....	83
Figura 21 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o segundo teste de calibração.....	83
Figura 22 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o terceiro teste de calibração.....	84

Figura 23 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o terceiro teste de calibração.....	85
Figura 24 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o quarto teste de calibração.	87
Figura 25 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o quarto teste de calibração.	87
Figura 26 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o quinto teste de calibração.....	89
Figura 27 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o quinto teste de calibração.	89
Figura 28 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o sexto teste de calibração.....	91
Figura 29 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o sexto teste de calibração.	91
Figura 30 - Correlação entre vazões estimadas e monitoradas pela estação de Fazenda Jucuruaba.....	93
Figura 31 - Correlação entre vazões estimadas e monitoradas pela estação de Córrego do Galo.....	93

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. GERAL.....	15
2.2. ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. BALANÇO HÍDRICO.....	16
3.1.1. Evapotranspiração e Evaporação.....	16
3.1.2. Precipitação	17
3.1.3. Interceptação pela cobertura vegetal	18
3.1.4. Infiltração	18
3.1.5. Armazenamento Superficial	19
3.1.6. Escoamento Superficial.....	19
3.1.7. Escoamento Subterrâneo	20
3.2. PEDOLOGIA E PROCESSOS HIDROLÓGICOS	21
3.3. MANEJO DO SOLO E PROCESSOS HIDROLÓGICOS	23
3.4. MODELOS HIDROLÓGICOS	25
3.5. MODELO SWAT	27
3.5.1. Fase terrestre	28
3.5.2. Fase aquática	42

3.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	43
3.7. CALIBRAÇÃO	44
4. METODOLOGIA	47
4.1. REGIÃO DE ESTUDO	47
4.2. VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO	48
4.2.1. Variáveis fisiográficas	49
4.2.2. Variáveis climáticas	58
4.2.3. Variáveis fluviométricas	61
4.3. PROCESSAMENTO DO MODELO SWAT	62
4.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	63
4.5. CALIBRAÇÃO	66
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS	69
5.2. ANÁLISE DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA ESTIMATIVA DE VAZÕES.....	74
5.2.1. Estimativa de vazões no SWAT	74
5.2.2. Processos de calibração no SWAT-CUP.....	80
5.3. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NA ESTIMATIVA DE VAZÕES	94
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
REFERÊNCIAS	102

1. INTRODUÇÃO

A gestão hídrica de bacias hidrográficas requer o uso de técnicas de planejamento que dependem de estimativas confiáveis das vazões, assim como de suas distribuições espacial e temporal.

Dentre os instrumentos técnicos utilizados na gestão hídrica, modelos computacionais vêm sendo desenvolvidos e aprimorados. Os modelos hidrológicos têm por objetivo representar sistemas ambientais, contribuindo para a compreensão dos fenômenos que envolvem os parâmetros do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, é possível antecipar e prever impactos ambientais.

O processo de modelagem de produção de água carrega inúmeras incertezas que estão relacionadas ao nível de detalhamento dos dados de entrada climáticos e fisiográficos da área de estudo. Incertezas associadas à aleatoriedade na distribuição espaço-temporal de dados climáticos, principalmente de precipitação, escala espacial de informações pedológicas e de uso e ocupação do solo, carência de dados locais medidos de solos, nível de resolução espacial de dados altimétricos, escolha de valores que representem informações fisiográficas da bacia dependendo do método de estimativa de vazões utilizado, entre outras variáveis.

O aprimoramento da resposta do modelo em uma bacia hidrográfica é alcançado através da calibração, quando os dados estimados se ajustam aos dados monitorados, o que depende de uma série de fatores, principalmente de um bom conjunto de dados observados. Um processo importante anterior à calibração é a análise de sensibilidade dos parâmetros, a qual permite identificar os parâmetros que influem significativamente nos dados simulados.

Entre as publicações disponíveis na literatura científica, observa-se uma concentração de estudos voltados para estimativa de vazões e respectiva calibração dos dados simulados. Há carência de trabalhos que investiguem as interferências no processo de calibração associadas às alterações dos procedimentos com relação à quantidade e localização dos dados observados na bacia hidrográfica, escolha de parâmetros levando em consideração o nível de sensibilidade, número de interações da simulação, entre outros.

Dentre os modelos hidrológicos, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido destaque no mundo devido à sua ampla utilização (GASMAM et. al., 2007), podendo ser aplicado em bacias agrícolas com estudos voltados à produção de água e de sedimentos, à qualidade da água, à perda de nutrientes em áreas agrícolas, além de simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas em função das alterações do uso e ocupação do solo.

Os principais estudos envolvendo o SWAT estão relacionados à avaliação da qualidade da água, seja com relação aos nutrientes, matéria orgânica, sedimentos, e outros compostos químicos. O processo que antecede esses estudos consiste na estimativa de vazões médias. Desse modo, é importante entender os elementos envolvidos nessa estimativa e nos procedimentos para obtenção de uma calibração adequada e coerente com determinada região de estudo.

Diante do exposto, o presente trabalho visa investigar a análise de sensibilidade de parâmetros do SWAT com relação à estimativa de vazões médias e a influência dos procedimentos adotados para calibração das vazões simuladas, para uma bacia hidrográfica rural piloto com área de aproximadamente 2000 Km², localizada no sudeste do estado do Espírito Santo.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Maior conhecimento a respeito do processo de calibração e da sensibilidade de parâmetros do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para estimativa de vazões médias em bacias hidrográficas rurais.

2.2. ESPECÍFICOS

Para o trabalho proposto foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- verificar a sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT com relação à estimativa de vazões médias mensais em bacias hidrográficas rurais;
- verificar a influência dos parâmetros de calibração do SWAT com relação à estimativa de vazões médias mensais em bacias hidrográficas rurais;
- avaliar diferentes testes de calibração do modelo SWAT das vazões mensais estimadas, com base em coeficientes estatísticos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BALANÇO HÍDRICO

O ciclo hidrológico é definido por Silveira (2014) como um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície da Terra e a atmosfera, impulsionado principalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.

O ciclo hidrológico se manifesta de várias formas nos diferentes pontos do planeta, devido a fatores como: desuniformidade com que a energia solar atinge a superfície terrestre; o diferente comportamento térmico dos continentes em relação aos oceanos; a quantidade de vapor d'água, os níveis de gás carbônico e de ozônio na atmosfera; a variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais; e a influência da rotação e inclinação do eixo da Terra na circulação atmosférica (SILVEIRA, 2014).

O elemento fundamental para análise do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica, que consiste de uma área de captação natural da água da chuva que converge os escoamentos para um único ponto de saída. Os escoamentos superficiais gerados, no contexto da bacia hidrográfica, podem ser interpretados como "produção de água para escoamento de água" (SILVEIRA, 2014).

3.1.1. Evapotranspiração e Evaporação

A evapotranspiração refere-se à perda de água por evaporação do solo e transpiração do vegetal, e ocorre quando a água é convertida em vapor e transferida para a atmosfera. A evaporação, no ramo da meteorologia, restringe-se à mudança de água no estado líquido para o estado de vapor devido à radiação solar, temperatura do ar, vento e pressão de vapor (TUCCI; BELTRAME, 2014). A transpiração consiste na eliminação da água, através das folhas dos vegetais, por meio de seus processos metabólicos (REICHARDT; TIMM, 2004).

A evapotranspiração potencial é um processo de perda de água para a atmosfera de um solo vegetado, sem restrição hídrica, num determinado período, para atender às

necessidades de evaporação do solo e da transpiração. Já a evapotranspiração real refere-se à perda de água de uma superfície natural em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal (THORNTHWAITE; WILM, 1944).

A evapotranspiração envolve inúmeros processos influenciados por muitos fatores locais, tais como umidade do solo, exigências de água pelos vegetais e natureza física da cobertura do solo (ALI et al., 2000). Quanto menor o armazenamento de água no solo, maior será a limitação imposta pela planta e pelo solo à evapotranspiração, que será menor que a potencial. A evapotranspiração real (ER) é a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal (PEREIRA et al., 1997).

Em um solo descoberto com alta umidade, a evaporação é inicialmente influenciada por fatores atmosféricos (radiação, velocidade do vento, etc.). Durante esta fase, o solo está úmido e com condutividade hidráulica suficiente para transportar água a uma taxa proporcional à demanda evaporativa. Após esta fase, a taxa de evaporação cai progressivamente abaixo da taxa potencial, sendo limitada, então, pelo fornecimento de água pelo perfil do solo por meio de suas características hidráulicas e pela profundidade do lençol freático (MENZIANI et al., 2001).

3.1.2. Precipitação

A precipitação é toda água proveniente da atmosfera que atinge a superfície da Terra, como neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve, que se diferenciam pelo estado no qual a água se encontra. A origem das precipitações está relacionada ao crescimento das gotículas das nuvens, que ocorre quando forem reunidas certas condições (BERTONI; TUCCI, 2014).

As condições do escoamento superficial são influenciadas pelas características e variabilidade espacial da precipitação. Algumas tempestades se concentram em pequenas áreas, enquanto outras se espalham sobre grandes áreas. A influência do movimento das tempestades no escoamento superficial depende de sua direção, velocidade e duração (LIMA; SINGH, 2002).

O fenômeno precipitação é considerado como a principal forma de retorno da água da atmosfera para a superfície terrestre, sendo o componente do ciclo hidrológico que apresenta maior variabilidade, tanto espacial quanto temporal, o que incide na necessidade da caracterização de seu padrão local e suas variações espaciais (ALMEIDA et al., 2011).

3.1.3. Intercepção pela cobertura vegetal

Em superfícies vegetadas, o primeiro obstáculo da chuva é a intercepção pela cobertura vegetal, definida como a retenção temporária de parte da precipitação acima da superfície do solo (BLAKE, 1975, **apud** TUCCI, 2014, p. 243). O volume retido evapora e retorna à atmosfera. A retenção de parte do escamento por depressões do terreno não pode ser considerada como intercepção, visto que parte do volume retido retorna à bacia hidrográfica através do processo de infiltração. A tendência é de que intercepção reduza a variação da vazão ao longo do ano, retarde e reduza o pico das cheias (TUCCI, 2014).

Segundo Tucci (2014), o tipo de vegetação caracteriza a quantidade de gotas que cada folha pode reter e sua densidade indica o volume retido numa superfície da bacia hidrográfica. Geralmente, a maior parte de intercepção ocorre nas folhas, porém a disposição dos troncos contribui significativamente.

A água retida na superfície vegetal pode ser representada por um reservatório do dossel vegetal, a capacidade de armazenamento de chuva no dossel varia de acordo com o tipo da espécie vegetal, o índice de área foliar e a capacidade de armazenamento específica de folhas, galhos e troncos (LIU, 1998).

3.1.4. Infiltração

A infiltração é a passagem de água da superfície do solo para seu interior. Esse processo depende da quantidade de água disponível para infiltrar, do tipo do solo, do estado da superfície do solo e das quantidades de água e ar presentes no seu interior (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2014).

A capacidade de infiltração refere-se ao potencial que o solo tem de absorver água pela superfície, em termos de lâmina por tempo. Se uma precipitação atinge o solo com uma intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetra no solo, provocando uma progressiva diminuição da capacidade de infiltração, já que o solo está umedecendo. Se a precipitação continuar, dependendo da sua intensidade, pode ocorrer um momento em que a capacidade de infiltração diminui até que sua taxa se iguale à intensidade da precipitação. A partir deste momento, mantendo-se a precipitação, a infiltração real se processa nas mesmas taxas da curva da capacidade de infiltração, que passa a decrescer exponencialmente no tempo, tendendo a um valor mínimo de infiltração (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2014).

3.1.5. Armazenamento Superficial

O armazenamento superficial corresponde ao armazenamento pelo microrrelevo da superfície do terreno, que consiste em pequenas depressões que devem ser preenchidas após o início do empoçamento e antes do início do escoamento superficial. Essa água armazenada não se tornará escoamento superficial, podendo infiltrar ou evaporar (OGDEN, 1998).

Em áreas agrícolas, a rugosidade da superfície do terreno é influenciada principalmente pelo tipo de preparo do solo, vegetação, tipo de solo e quantidade e intensidade de precipitação (HANSEN; SCHJONNING; SIBBESEN, 1999).

3.1.6. Escoamento Superficial

O escoamento superficial corresponde ao escoamento da água que ocorre quando o excesso de águas pluviais escoam sobre a superfície terrestre. Isso pode ocorrer porque o solo atingiu sua capacidade máxima de saturação, pelo fato da chuva atingir o solo mais rápido que sua capacidade de absorção, ou porque áreas impermeáveis escoam essas águas para o solo permeável que não pode absorver todo esse escoamento (HORTON, 1939).

Gerits et. al. (1990) distinguem quatro grandes classes de escoamento superficial:

- escoamento superficial Hortoniano - ocorre quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo;
- escoamento superficial Hortoniano com atraso - ocorre quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo somente após certo tempo;
- escoamento superficial com saturação da camada superior do solo - ocorre em solos nos quais uma camada relativamente permeável sobrepõe uma camada com material menos permeável;
- escoamento superficial saturado - ocorre quando a capacidade de armazenamento do solo está esgotada, de forma que o incremento subsequente de água na superfície força o escoamento superficial.

O escoamento superficial também é referenciado como escoamento rápido e constitui o principal responsável pelas cheias e enchentes urbanas. Em bacias rurais, entre os impactos causados pelo escoamento superficial, destaca-se a erosão hídrica, considerada a causa da perda de nutrientes, bem como da produtividade (MAMO; BUBENZER, 2001).

3.1.7. Escoamento Subterrâneo

O escoamento subterrâneo ou escoamento base é aquele produzido pela drenagem natural do aquífero, relacionado à produção de água na bacia hidrográfica durante as estações secas. Este tipo de escoamento é fundamental em regiões que possuem regime pluviométrico de baixa intensidade e longa duração e relevo consideravelmente plano, onde o escoamento pela superfície dificilmente é significativo. O comportamento do escoamento subterrâneo em termos dinâmicos é especialmente lento, os valores de vazão variam na ordem de dias na ausência de chuva (DEG, 2015).

Segundo Wanderley (2000) a região sub-superficial pode ser dividida em duas zonas: saturada, no qual a água ocupa todos os vazios da matriz sólida; e não saturada, onde se considera que a água não preenche todos os vazios, por isso há presença de gases. A descrição do escoamento em solo não saturado é algo amplamente

complexo, visto que a presença de ar nos poros de um solo afeta fortemente as suas características hidráulicas.

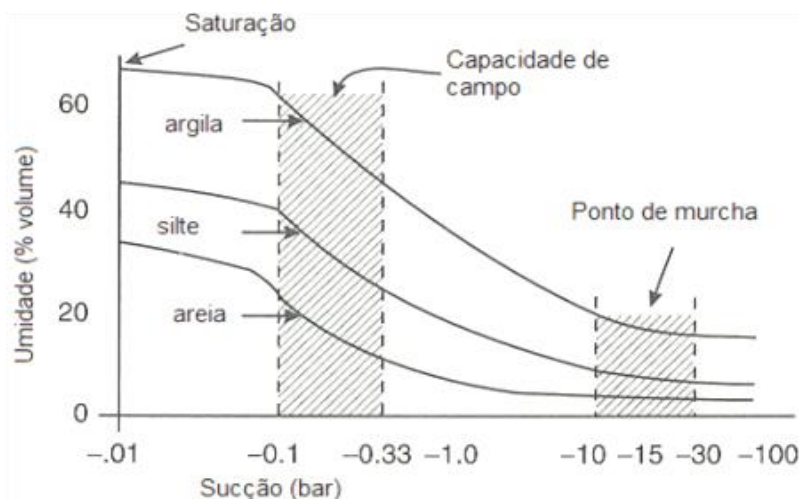
3.2. PEDOLOGIA E PROCESSOS HIDROLÓGICOS

O solo é um sistema trifásico formado por uma fase gasosa, uma líquida, e uma sólida composta por minerais, matéria orgânica e componentes químicos (FREITAS, 2005). A textura do solo classifica os componentes sólidos do solo em classes de acordo com sua granulometria em areia, silte e argila (KIEHL, 1979).

A fase gasosa refere-se ao ar dentro dos poros, importante para processos ecológicos, como a respiração de micro-organismos e das raízes de vegetais, e também em processos de formação do solo, por exemplo, nos processos de oxidação da matéria orgânica (LEPSCH, 2010).

O solo é capaz de receber e reter água, de forma que o comportamento da água no solo pode ser representado pela curva de retenção da água ilustrada na Figura 1.

Figura 1 - Curva de retenção de água no solo.



Fonte: Ward e Trimble (2004).

Alguns conceitos importantes em processos hidrológicos podem ser identificados nessa curva, tais como:

- saturação - todos os poros estão preenchidos por água e o ar é praticamente ausente. Em condições naturais, depois que os poros estão saturados com água, e cessa seu fornecimento, o líquido contido nos poros maiores drena para baixo ou lateralmente, até chegar ao lençol freático, pela ação da gravidade (LEPSCH, 2010);
- água total disponível - água disponível entre o intervalo de umidade da capacidade de campo até o ponto de murcha permanente (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1927, **apud** REICHARDT; TIMM, 2004, p. 311);
- capacidade de campo - quantidade de água retida pelo solo após a cessada a drenagem de seu excesso, quando a velocidade do movimento descendente praticamente cessa, tensão de aproximadamente -0,1 a -0,3 atm (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949, **apud** REICHARDT; TIMM, 2004, p. 281);
- ponto de murcha permanente - umidade do solo na qual uma planta murcha não restabelece turgidez, mesmo em atmosfera saturada durante doze horas, está associado a um potencial hídrico de aproximadamente -15 atm (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949, **apud** REICHARDT; TIMM, 2004, p. 311).

O movimento e armazenamento da água no solo dependem de uma série de fatores (FREITAS, 2005):

- tempo - a taxa de infiltração decresce com o tempo, havendo diferença entre os potenciais de água no perfil e aumento da distância entre eles com o tempo haverá diminuição do fluxo;
- teor inicial de umidade do solo - a taxa de infiltração decresce com o aumento do teor de umidade do solo, pois haverá menor diferença entre os potenciais de água nas zonas de saturação e de molhamento, diminuindo a força provocada pelo gradiente de potencial;
- condutibilidade hidráulica - quanto maior for a condutibilidade hidráulica média no perfil, maiores serão os valores da velocidade de infiltração. A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água

nele se movimenta, depende da quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros;

- matéria orgânica - a adição ou existência de materiais orgânicos favorecem a infiltração nos horizontes onde atuam. A presença de raízes tende a aumentar a infiltração. A profundidade efetiva do sistema radicular é a profundidade do solo onde se concentra o maior volume de raízes, que é particularmente útil para a determinação da lâmina de água no solo que pode estar disponível às plantas;
- razão de aplicação de água - quanto maior for a razão de aplicação de água, mais profunda a frente de molhamento para uma mesma quantidade de água aplicada e, conseqüentemente, menor o teor de umidade do solo do perfil umedecido;
- textura e estrutura - os solos de textura mais grosseira podem ter altas taxas de infiltração, como é o caso de solos arenosos que são friáveis, desagregáveis, de boa drenagem, aeração adequada e aração fácil, porém têm baixas capacidades de retenção e condução de água e nutrientes. Já os solos argilosos ou de textura fina apresentam taxas de infiltração próximas de zero em casos de solo sem estruturação.

Outra propriedade do solo relacionada aos processos hidrológicos, no caso da evapotranspiração, refere-se ao albedo do solo. Denomina-se albedo o poder refletor de uma superfície, definida como a fração de radiação solar refletida pela superfície em relação à recebida. O albedo depende da topografia, coloração do solo, rugosidade, etc. (REICHARDT; TIMM, 2004).

3.3. MANEJO DO SOLO E PROCESSOS HIDROLÓGICOS

A ação antrópica sobre o uso e ocupação do solo pode produzir impactos nos processos hidrológicos terrestres, como a redução ou aumento da vazão média, máxima e mínima e alterações na qualidade da água de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2002).

A resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica a diferentes sistemas de uso e manejo do solo é importante no processo de modelagem do escoamento superficial. O conhecimento dos efeitos da variação no uso da terra sobre o movimento de sedimentos e água através da bacia hidrográfica é essencial para a tomada de decisões sobre o manejo de uso da terra (PRUSKI et al., 2001).

A troca de uma cobertura do solo altera o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica, a retirada da cobertura vegetal acarreta alterações na interceptação da chuva, causando uma maior exposição do solo a estes eventos, de forma a aumentar a probabilidade de encrostamento superficial e consequente diminuição da taxa de infiltração e aumento do escoamento superficial (LATUF, 2007).

Rodrigues (2015) analisou por meio do SWAT a dinâmica da vazão na bacia do Rio Pará, em Minas Gerais, Brasil, com o intuito de avaliar o impacto decorrente das alterações de uso do solo na disponibilidade de água. Verificou-se que houve incremento de vazão de aproximadamente 10% devido às alterações no uso do solo, considerando a supressão da vegetação original de Cerrado e de Floresta Estacional Semidecidual para implantação de pastagem em 38% do território da bacia hidrográfica.

Durães, Mello e Naghettini (2011) simularam o comportamento hidrológico da bacia do rio Paraopeba, estado de Minas Gerais, sob diferentes usos e ocupação do solo através do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Paraopeba (MG). As mudanças no uso e ocupação do solo basearam os cenários de crescimento anual do Relatório Parcial do Plano Diretor da Bacia do rio Paraopeba. O cenário atual de uso do solo apresentou uma vazão de pico simulada de 1250 m³/s, enquanto que nos anos de 2019 e 2029, as vazões máximas simuladas foram de 1190 m³/s e 1230 m³/s, respectivamente. O cenário relativo ao ano 2019 produziu os melhores resultados com relação ao aumento do escoamento de base e redução das vazões máximas.

Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013) simularam cenários de agricultura, mata nativa e pastagem para a bacia hidrográfica do ribeirão Concórdia, no estado de Santa Catarina, utilizando o modelo SWAT, e analisaram os efeitos dessas mudanças no fluxo de água. O cenário da mata nativa apresentou uma redução de 8,70% na vazão média, em relação ao cenário atual. Já o cenário de pastagem apresentou um acréscimo de cerca de 20% e o cenário de agricultura gerou valor médio de vazão similar ao atual.

3.4. MODELOS HIDROLÓGICOS

O modelo matemático é uma representação do comportamento de um sistema natural que pode ser expresso por equações matemáticas e, dependendo de sua versatilidade, pode modificar a lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um sistema ou de diferentes sistemas (BARTH, et al., 1987).

Hassuda (2000) descreve alguns procedimentos para a construção de um modelo matemático que represente um sistema real: desenvolvimento do modelo conceitual, no qual consiste do levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real; seleção do programa computacional; tradução do modelo conceitual para a linguagem matemática; bancos de dados para a entrada das informações no programa selecionado; e calibração do modelo matemático a fim de diminuir as incertezas do modelo matemático em relação ao sistema real.

Maidment (1993) define modelo hidrológico como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo. Modelos hidrológicos podem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação e por evaporação, a infiltração, a percolação, o escoamento superficial, subsuperficial e nos canais de escoamento, ou representar parte dessas variáveis (RENNÓ; SOARES, 2000).

Os modelos apresentam diferentes abordagens (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009; TUCCI, 1998):

- a) em relação à distribuição espacial do fenômeno:
 - concentrado - quando não leva em consideração a variabilidade espacial. Por exemplo, uma bacia hidrográfica representada por uma precipitação média;
 - distribuído - os parâmetros e variáveis dependem do espaço e/ou tempo, como por exemplo, parâmetros variando de acordo com as subdivisões em uma bacia.
- b) quando há uma relação temporal:
 - dinâmico - envolve mudanças e interações ao longo do tempo;

- estático - examina os processos sem considerar o fator temporal.
- c) com base nas equações:
- conceitual - quando levam em consideração os conceitos físicos, tal como considerar as equações de conservação de massa e quantidade de movimento para descrever o movimento da água no solo;
 - empírico ou "caixa-preta" - se ajustam os valores calculados aos dados observados por meio de funções sem relação com os processos físicos envolvidos.
- d) com base na representação espacial dos dados simulados:
- contínuos - trabalham em períodos sem interrupções;
 - discretos - se restringem a analisar eventos isolados.
- e) em função da presença ou ausência do conceito de probabilidade:
- estocástico - insere o conceito de probabilidade em suas formulações;
 - determinístico: segue leis definidas que não a lei das probabilidades.
- f) em relação à aplicação ao gerenciamento dos recursos hídricos:
- comportamental - aplicados na descrição comportamental do sistema, através de prognósticos e mediante as diferentes entradas de dados;
 - otimização - destinam-se a obter as melhores soluções para projetos;
 - planejamento - visam obter soluções no âmbito hidráulico, hidrológico, econômico, socioeconômico e ambiental, por meio de simulações em macrocondições.

As principais limitações da modelagem hidrológica referem-se aos aspectos quantitativos e qualitativos dos dados hidrológicos, as dificuldades em formular expressões matemáticas, e a simplificação espacial de variáveis e fenômenos. Devido as dificuldades encontradas na modelagem de uma bacia hidrográfica em função da heterogeneidade dos processos envolvidos, diversos modelos têm sido desenvolvidos, os quais se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 1998).

Por outro lado, a principal vantagem da modelagem reside na possibilidade do estudo de inúmeros cenários diferentes e de maneira rápida e com baixo custo. Na maioria das aplicações, o custo financeiro com a tecnologia computacional para executar um programa são ordens de magnitude menor que o correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fato adquire maior importância no contexto da bacia hidrográfica, no qual o problema real apresenta maiores dimensões e complexidade (TUCCI, 1998).

Uma vantagem operacional da modelagem hidrológica é o processamento dos dados alinhados com o Sistema de Informações Geográficas (SIG), um sistema de apresentação e processamento de dados com módulos para a realização de operações analíticas, sobreposição e cruzamento de informações. Seu banco de dados permite a associação de atributos e a realização de consultas, permitindo a análise e modelagem de informações espacialmente distribuídos (MINGOTI, 2009).

Uma etapa importante do processo da modelagem consiste na calibração do modelo, a qual é precedida pela análise de sensibilidade dos parâmetros. A calibração pode ser manual ou automática, sendo que a primeira consiste em alterar os valores dos parâmetros de entrada a fim de produzir valores simulados que se aproximem dos dados mensurados, já a segunda utiliza algoritmos de otimização e/ou técnicas de análise de incertezas (BEVEN, 2001).

3.5. MODELO SWAT

O modelo matemático *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi desenvolvido por Jeff Arnold e sua equipe do Serviço de Pesquisa na Agricultura do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. O SWAT tem por objetivo simular o impacto do manejo do solo na produção de água e de sedimentos, no contexto de bacia hidrográfica, com diversos tipos, uso e condições de manejo do solo ao longo do tempo (NEITSCH et al., 2011).

Segundo Tucci (1998) o SWAT pode ser classificado como um modelo de simulação matemática contínuo, semidistribuído, determinístico e semiconceitual, que requer informações (dados de entrada) específicas. O modelo é operado por meio de uma

extensão gratuita denominada *ArcSWAT* acoplada a um *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

O SWAT consiste de um modelo matemático que simula diferentes processos físicos em bacias hidrográficas, a fim de analisar impactos ocasionados por alterações no uso e tipo do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994).

Os componentes do SWAT podem ser divididos em (NEITSCH et al., 2011): hidrologia (escoamento superficial, evapotranspiração, movimento da água no solo e água subterrânea); clima; sedimentação; temperatura do solo; crescimento da vegetação; nutrientes; pesticidas; e práticas de manejo.

O modelo propõe a divisão de uma bacia hidrográfica em várias sub-bacias. As simulações nas bacias hidrográficas são separadas na fase terrestre (*land fase*), que controla a dispersão da água, sedimentos e compostos químicos para o corpo d'água de cada sub-bacia, e na fase aquática (*water or routing fase*), que estuda o movimento da água, dos sedimentos, etc., no corpo d'água até o ponto de descarga (NEITSCH et al., 2011).

3.5.1. Fase terrestre

Na fase terrestre, o ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado na equação 01 de balanço hídrico (NEITSCH et al., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{dia} - Q_{superf} - E_a - w_{inf} - Q_{fr}) \quad (01)$$

Sendo,

SW_t = quantidade final de água no solo (mm); SW_0 = quantidade inicial de água no solo, expresso como uma fração do teor de água da capacidade de campo (mm); t = tempo (dias); R_{dia} = precipitação no dia i (mm); Q_{superf} = escoamento superficial no dia i (mm); E_a = evapotranspiração no dia i (mm); w_{inf} = percolação e vazão de retorno no dia i (mm); Q_{fr} = fluxo de água subterrânea no dia i (mm).

3.5.1.1. Precipitação (R_{dia})

A precipitação pode ser interceptada e armazenada no dossel da vegetação ou cair na superfície do solo, no último caso, a água pode infiltrar no solo ou escoar em sua superfície. Essa variável pode ser lida de um arquivo de entrada ou gerada pelo modelo a partir de parâmetros estatísticos (NEITSCH et al., 2011).

3.5.1.2. Escoamento superficial (Q_{superf})

O modelo SWAT fornece dois métodos para estimar o escoamento superficial: o procedimento número de Curva, do *Soil Conservation Service* (SCS) e o método de infiltração *Green & Ampt* (NEITSCH et al., 2011). Devido à aplicação deste trabalho, será delineado o método proposto por *Soil Conservation Service*.

O modelo SCS calcula o escoamento superficial de acordo com o tipo de solo e das condições de cobertura do solo de uma bacia hidrográfica retratada por meio do parâmetro CN, no qual varia de 0 a 100 (SCS, 1972). O escoamento superficial é estimado segundo a relação 02.

$$Q_{superf} = \frac{(R_{dia} - 0,2S)^2}{(R_{dia} + 0,8S)} \quad (02)$$

Sendo S o parâmetro de retenção que pode ser obtido pelo SWAT como função da umidade do solo ou de acordo com a evapotranspiração vegetal (NEITSCH et al., 2011). O presente estudo optou pela variação deste parâmetro varia de acordo com a umidade, pois assim o escoamento superficial se torna dependente do tipo e uso e ocupação do solo. Neste caso, aplica-se a equação 03 e suas respectivas variáveis, estimadas pelas equações 04, 05 e 06.

$$S = S_{m\acute{a}x} \left[1 - \frac{SW_t}{(SW_t + e^{(w_1 - w_2 SW)})} \right] \quad (03)$$

$$S_{m\acute{a}x} = 25,4 \left(\frac{1000}{CN1} - 10 \right) \quad (04)$$

$$w_1 = \ln \left(\frac{FC}{1 - \frac{S_3}{S_{m\acute{a}x}}} - FC \right) + w_2 FC \quad (05)$$

$$w_2 = \frac{\ln \left(\frac{FC}{1 - \frac{S_3}{S_{m\acute{a}x}}} - FC \right) + - \ln \left(\frac{SAT}{1 - \frac{2,545}{S_{m\acute{a}x}}} - SAT \right)}{SAT - FC} \quad (06)$$

Em que:

SW = umidade do solo de todo perfil excluindo a água retida no ponto de murcha (mm) quando a condição de umidade I; $CN1$ = número da curva para condição de umidade I; $S_{m\acute{a}x}$ = parâmetro de retenção máximo; S_3 = parâmetro de retenção para $CN3$ (número da curva para condição de umidade III); w_1 e w_2 = coeficientes de forma; FC = quantidade de água no solo na capacidade de campo, na umidade III (mm); SAT = quantidade de água no solo saturado quando $CN = 99$ (mm).

A variável FC é definida pela equação 07.

$$FC = WP + AWC \quad (07)$$

Sendo, AWC a quantidade de água disponível para as plantas, em mm (parâmetro de entrada do modelo) e WP a fração da água existente no ponto de murcha permanente (mm), definido pela equação 08.

$$WP = 0,40 \frac{m_c \rho_b}{100} \quad (08)$$

Em que, ρ_b : densidade do solo (mg/m^3); m_c = porcentagem de argila (%).

A atribuição do valor do número da curva (CN) requer a classificação dos solos em quatro grupos hidrológicos e a definição de três condições de umidade.

Os solos podem ser classificados em quatro grupos hidrológicos, de acordo com sua capacidade de infiltração e geologia (SCS, 1986):

- solo A - produz baixo escoamento superficial e alta infiltração. São solos profundos e bem drenados, a areias ou cascalhos arenosos profundos;
- solo B - menos permeáveis do que o A. São solos arenosos menos profundos do que o tipo A, bem drenados, textura média a grossa;

- solo C - geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila, pouco profundo;
- solo D - contém argilas expansivas e pouco profundas, com muito baixa capacidade de infiltração, gerando maior proporção de escoamento superficial.

As condições de umidade antecedente da bacia hidrográfica podem ser de três formas (SCS, 1986):

- condição I - solos da bacia hidrográfica estão secos, porém não até o ponto de murchamento das plantas (seco, CN1);
- condição II - situação média das condições dos solos das bacias hidrográficas que precederam a ocorrência de cheia máxima anual em numerosas bacias (umidade média, CN2).
- condição III - chuva intensa nos 5 dias anteriores a tormenta e o solo está quase saturado (úmido, CN3).

O valor para o CN2 é obtido através das Tabelas 1 e 2. Os números da curva para as condições de umidade I e III (CN1 e CN3) são calculados pelas equações 09 e 10, respectivamente.

$$CN1 = CN2 - \frac{20(100 - CN2)}{(100 - CN2 + e^{2,533 - 0,0636(100 - CN2)})} \quad (09)$$

$$CN3 = CN2 * e^{0,00673(100 - CN2)} \quad (10)$$

Tabela 1 - CN para áreas agrícolas.

Cobertura			Grupo hidrológico			
Uso do solo	Tratamento	Condição hidrológica	A	B	C	D
Incultivável	Solo descoberto	-	77	86	91	94
	Cobertura vegetal	Pobre	76	85	90	93
		Boa	74	83	88	90
Plantações em fileiras	Em fileiras retas	Pobre	72	81	88	91
		Boa	67	78	85	89
	Em fileiras retas com resíduos	Pobre	71	80	87	90
		Boa	64	75	82	85
	Em curva de nível	Pobre	70	79	84	88
		Boa	65	75	82	86
	Em curva de nível com resíduos	Pobre	69	78	83	87
		Boa	64	74	81	85
	Em curva de nível e terraços	Pobre	66	74	80	82
		Boa	62	71	78	81
	Em curva de nível e terraços com resíduos	Pobre	65	73	79	81
		Boa	61	70	77	80
Plantações de cereais	Em fileiras retas	Pobre	65	76	84	88
		Boa	63	75	83	87
	Em fileiras retas com resíduos	Pobre	64	75	83	86
		Boa	60	72	80	84
	Em curva de nível	Pobre	63	74	82	85
		Boa	61	73	81	84
	Em curva de nível com resíduos	Pobre	62	73	81	84
		Boa	60	72	80	83
	Em curva de nível e terraços	Pobre	61	72	79	82
		Boa	59	70	78	81
	Em curva de nível e terraços com resíduos	Pobre	60	71	78	81
		Boa	58	69	77	80
Plantações de legumes	Em fileiras retas	Pobre	66	77	85	89
		Boa	58	72	81	85
	Em curva de nível	Pobre	64	75	83	85
		Boa	55	69	78	83
	Em curva de nível e terraços	Pobre	63	73	80	83
		Boa	51	67	76	80
Pastagem	< 50% de cobertura do solo	Pobre	68	79	86	89
	50% a 75% de cobertura do solo	Razoável	49	69	79	84
	> 75% de cobertura do solo	Boa	39	61	74	80
Campos	Gramma contínua	-	30	58	71	78
Terreno de ervas daninhas	< 50% de cobertura do solo	Pobre	48	67	77	83
	50% a 75% de cobertura do solo	Razoável	35	56	70	77
	> 75% de cobertura do solo	Boa	30	48	65	73
Florestas	Pomares	Pobre	57	73	82	86
		Razoável	43	65	76	82
		Boa	32	58	72	79
Florestas	Detritos de florestas, árvores pequenas	Pobre	45	66	77	83
	Matas roçadas, mas não queimadas	Razoável	36	60	73	79
	Matas protegidas	Boa	30	55	70	77
Chácaras	Construções, estradas, lotes	-	59	74	82	86

Fonte: Adaptado de SCS (1986).

Tabela 2 - CN para áreas urbanas.

Cobertura			Grupo hidrológico			
Tipo de cobertura	Condição hidrológica	Média da % impermeável	A	B	C	D
Espaços abertos (gramados, parques, cemitérios)	Pobre ¹	-	68	79	86	89
	Razoável ¹	-	49	69	79	84
	Boa ¹	-	39	61	74	80
Estacionamentos pavimentados, telhados, viadutos, etc	-	-	98	98	98	98
Estradas e ruas pavimentadas	-	-	83	89	92	93
Estradas e ruas de paralelepípedo	-	-	76	85	89	91
Estradas e ruas de terra	-	-	72	82	87	89
Zonas comerciais e escritórios	-	85%	89	92	94	95
Zonas industriais	-	72%	81	88	91	93
Zonas residenciais:						
0,05 hectares ou menores	-	65%	77	85	90	92
0,10 hectares	-	38%	61	75	83	87
0,13 hectares	-	30%	57	72	81	86
0,20 hectares	-	25%	54	70	80	85
0,40 hectares	-	20%	51	68	79	84
0,81 hectares	-	12%	46	65	77	82
Novas áreas graduadas (sem vegetação)	-	-	77	86	91	94

¹ Pobre: < 50% de cobertura de gramínea; Razoável: 50% a 75% de cobertura de gramínea; Boa: > 75% de cobertura de gramínea.

Fonte: Adaptado de SCS (1986).

Em grandes bacias hidrográficas, quando o tempo de concentração é superior a um dia, somente uma porção alcançará o canal principal no dia, então o SWAT gera de um atraso ou retardo em parte do escoamento, assim, a quantidade de escoamento superficial liberada para o canal principal é dada pela equação 11 (NEITSCH et al., 2011).

$$Q_{superf} = (Q'_{superf} + Q_{superf,i-1}) \left(1 - e^{-\frac{surlag}{t_{conc}}} \right) \quad (11)$$

Em que, Q_{superf} = quantidade de escoamento superficial liberada para o canal principal num dia (mm); Q'_{superf} = quantidade de escoamento superficial gerada na sub-bacia num dia (mm); $Q_{superf,i-1}$ = quantidade de escoamento superficial

armazenado no dia anterior (mm); $surlag$ = coeficiente de atraso do escoamento superficial; t_{conc} = tempo de concentração na sub-bacia (h), definido pelas equações 12, 13 e 14.

$$t_{conc} = t_{conce} + t_{concc} \quad (12)$$

$$t_{conce} = \frac{L^{0,6} \eta^{0,6}}{18slp^{0,3}} \quad (13)$$

$$t_{concc} = \frac{0,62L_{ch}\eta^{0,75}}{A^{0,125}slp_{ch}^{0,375}} \quad (14)$$

Sendo,

t_{conce} = tempo de concentração para o escoamento superficial (h); t_{concc} = tempo de concentração para o escoamento do canal (h); L = comprimento da inclinação da sub-bacia (m); η = coeficiente de rugosidade de Manning; L_{ch} = comprimento do canal (Km); slp_{ch} = inclinação do canal (m/m).

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os valores para o coeficiente de *Manning* para escoamento superficial e para o escoamento do canal.

Tabela 3 - Valores do coeficiente de Manning para escoamento superficial.

Características da superfície da terra	Média	Intervalo
Incultivável sem resíduos	0,010	0,008 - 0,012
Lavoura convencional sem resíduos	0,090	0,060 - 0,120
Lavoura convencional com resíduos	0,190	0,160 - 0,220
Escarificada sem resíduos	0,090	0,060 - 0,120
Escarificada com resíduos	0,130	0,100 - 0,160
Plantio direto sem resíduos	0,070	0,040 - 0,100
Plantio direto 0,5-1 ton/ha com resíduos	0,120	0,070 - 0,170
Plantio direto 2-9 ton/ha com resíduos	0,300	0,170 - 0,470
Pastagem com 20% de cobertura	0,600	-
Pradaria com gramíneas curtas	0,150	0,100 - 0,200
Gramíneas densas	0,240	0,170 - 0,300
Gramínea bermuda	0,410	0,300 - 0,480

Fonte: Engman (1983), **apud** Neitsch et al. (2011).

Tabela 4 - Valores do coeficiente de Manning para escoamento no canal.

Características do canal	Média	Intervalo
Escavado ou drenado:		
Em terra, reto e uniforme	0,025	0,016 - 0,033
Em terra, curva e lento	0,035	0,023 - 0,050
Não preservado, com ervas daninhas	0,075	0,040 - 0,140
Canal natural:		
Algumas árvores e pedras	0,050	0,025 - 0,065
Madeira densa	0,100	0,050 - 0,150

Fonte: Chow (1959), **apud** Neitsch et al (2011).

3.5.1.3. Evapotranspiração (E_a)

A evapotranspiração inclui todos os processos pelo qual a água na superfície da terra é convertida para vapor de água. Isto inclui evaporação do dossel de planta, transpiração, sublimação e evaporação do solo (NEITSCH et al., 2011).

O potencial de evapotranspiração é a taxa na qual a evapotranspiração poderia ocorrer numa área extensa e uniformemente coberta por vegetação, com acesso ilimitado de água no solo. O modelo estima esse potencial por três opções: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith (NEITSCH et al., 2011).

O método aplicado neste estudo será o Penman-Monteith pelo fato do potencial de evapotranspiração ser estimado, segundo a equação 15, por dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. O método de Priestley-Taylor não considerada a influência da velocidade do vento, e o método Hargreaves requer apenas dados de temperatura do ar.

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + \rho_{ar} c_p (e_z^0 - e_z)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (15)$$

Sendo,

λE = densidade de fluxo de calor latente (MJ/m².d); E = taxa de evaporação de profundidade (mm/d); λ = calor latente de vaporização (MJ/Kg) (equação 16);

$$\lambda = 2,501 - 2,361.10^{-3} \bar{T}_{av} \quad (16)$$

\bar{T}_{av} = temperatura média diária de ar ($^{\circ}\text{C}$); Δ = declividade da curva de pressão-temperatura do vapor de saturação ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) (equação 17);

$$\Delta = \frac{4098e^0}{(\bar{T}_{av} + 237,3)^2} \quad (17)$$

e^0 = pressão de vapor de saturação de ar em determinado dia (kPa) (equação 18);

$$e^0 = \exp\left(\frac{16,78\bar{T}_{av} - 116,9}{\bar{T}_{av} + 237,3}\right) \quad (18)$$

H_{net} = rede de radiação ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{d}$) (equação 19);

$$H_{net} = (1 - \alpha)H_{day} + H_b \quad (19)$$

α = refletância ou albedo de onda curta (equação 20);

$$\alpha = \alpha_{plant}(1 - cov_{sol}) + \alpha_{soil}cov_{sol} \quad (20)$$

α_{plant} = albedo da planta (0,23); α_{soil} = albedo do solo; cov_{sol} = índice de cobertura do solo (equação 21);

$$cov_{sol} = e^{-5.10^{-5}cv} \quad (21)$$

CV = biomassa e resíduos acima do solo (Kg/ha); H_{day} = solar de onda curta que atinge o solo ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{d}$); H_b = radiação líquida de onda longa de entrada ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{d}$) (equação 22);

$$H_b = -\left(0,9 \frac{H_{day}}{H_{mx}} + 0,1\right)(0,34 - 0,139\sqrt{e})\sigma T_k^4 \quad (22)$$

σ = constante de Stefan-Boltzman ($4,903.10^{-9} \text{ MJ}/\text{m}^2.\text{K}^4.\text{d}$); T_k = temperatura média do ar ($273,15 \text{ K}$); H_{mx} = radiação solar máxima possível de atingir a superfície do solo, num dia ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{d}$); e = pressão de vapor (kPa) (equação 23);

$$e = R_h e^0 \quad (23)$$

R_h = umidade relativa do ar; G = densidade do fluxo de calor para o solo ($0 \text{ MJ}/\text{m}^2.\text{d}$);

Liberção ou armazenamento de calor do solo pode ser significativa em poucas horas, mas é geralmente pequena de um dia para o outro, porque o calor armazenado, assim que o solo aquece de manhã, é perdido quando o solo esfria à tarde ou à noite. Uma vez que a magnitude do fluxo de calor diário do solo durante um período de 10 a 30

dias é pequeno quando o solo está coberto de vegetação, o fluxo de calor do solo pode ser normalmente ignorado para a maioria das estimativas de equilíbrio de energia (NEITSCH et al., 2011).

ρ_{ar} = densidade de ar (Kg/m^3); c_p = calor específico do ar úmido ($1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ/Kg.}^\circ\text{C}$); e_z^0 = pressão de vapor de saturação de ar na altura z (kPa); e_z = pressão de vapor de saturação de água na altura z (kPa); y = constante psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$) (equação 24);

$$y = \frac{c_p P}{0,622 \lambda} \quad (24)$$

P = pressão atmosférica (kPa) (equação 25);

$$P = 101,3 - 0,01152EL + 0,544 \cdot 10^{-6}EL^2 \quad (25)$$

EL = elevação (m); r_a = resistência de difusão da camada de ar (s/m) (equação 26);

$$r_a = \frac{\ln[(z_w - d)/z_{om}] \ln[(z_p - d)/z_{ov}]}{k^2 u_z} \quad (26)$$

z_w = altura da medida da velocidade do ar (170 cm); d = deslocamento do plano zero do perfil do vento (cm); z_p = altura das medidas de umidade (psicrômetro) e temperatura (170 cm); k = constante de Von Kármán (0,41); u_z = velocidade do vento na altura z (m/s); z_{om} = comprimento da rugosidade da transferência de momento (cm) (equação 27);

$$z_{om} = \begin{cases} h_c/8,15, & \text{se } h_c \leq 200\text{cm} \\ 0,058h_c^{1,19}, & \text{se } h_c > 200\text{cm} \end{cases} \quad (27)$$

h_c = altura média do dossel da planta (cm); z_{ov} = comprimento da rugosidade da transferência de vapor (cm) (equação 28);

$$z_{ov} = 0,1z_{om} \quad (28)$$

r_c = resistência do dossel da planta (s/m) (equação 33);

$$r_c = \frac{1}{0,5g_l \text{LAI}} \quad (29)$$

g_l = condutância máxima da folha (m/s); LAI = índice foliar do dossel.

Primeiramente, o SWAT evapora qualquer precipitação interceptada pelo dossel da planta. Depois, calcula a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima

de evaporação do solo (NEITSCH et al., 2011). A evaporação real da precipitação retida do dossel é dada pelas equações 30 ou 31.

Se a evaporação potencial é menor que a quantidade de água retida no dossel:

$$E_{can} = E_a = E_o \quad (30)$$

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} - E_{can} \quad (31)$$

Se a evaporação potencial é maior que a quantidade de água retida no dossel:

$$E_{can} = R_{INT(i)} \quad (32)$$

$$R_{INT(f)} = 0 \quad (33)$$

Sendo, E_{can} = quantidade de evaporação dentro do dossel num dia (mm); E_a = quantidade real de evapotranspiração num dia (mm); R_{INT} = quantidade de água armazenada no dossel (mm), i (inicial), f (final) num dia, determinado pelas equações 34 ou 35;

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} + R'_{day} \text{ e } R_{day} = 0, \quad (34)$$

$$\text{se } R'_{day} \leq can_{day} - R_{INT(i)}$$

$$R_{INT(f)} = can_{day} \text{ e } R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{INT(i)}), \quad (35)$$

$$\text{se } R'_{day} > can_{day} - R_{INT(i)}$$

R'_{day} = quantidade de precipitação antes que a interceptação do dossel seja removida num dia (mm); can_{day} = quantidade máxima de água que pode ficar retida no dossel num dia (mm) (equação 36);

$$can_{day} = can_{mx} \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (36)$$

can_{mx} = quantidade máxima de água que pode ficar retida no dossel quando o mesmo estiver completamente desenvolvido num dia (mm); LAI_{mx} = índice foliar do dossel máximo.

Se a evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de Penman-Monteith, a transpiração pode ser calculada pelas mesmas equações (NEITSCH et al., 2011).

A quantidade de evaporação do solo será impactada pelo grau de sombreamento, é calculada pela expressão 37 (NEITSCH et al., 2011).

$$E_s = E'_o cov_{sol} \quad (37)$$

Em que, E_s = evaporação máxima do solo em um dia (mm); E'_o = evapotranspiração potencial ajustada para evaporação de água livre dentro dossel (mm).

3.5.1.4. Percolação e vazão de retorno (w_{inf})

A água somente poderá percolar se umidade do solo exceder a capacidade de campo para a camada em questão e a camada inferior não estiver saturada (NEITSCH et al., 2011). A equação 38 descreve a quantidade de água que percola na camada de solo.

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,ex} \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}} \right) \quad (38)$$

Em que, $w_{perc,ly}$ = quantidade de água que percola na camada de solo na camada ly (mm); $SW_{ly,ex}$ = volume de água drenável na camada de solo na camada ly (mm); Δt = intervalo de tempo (h); TT_{perc} = tempo de duração da percolação (h), definido pela equação 39;

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (39)$$

SAT_{ly} = quantidade de água no solo saturado na camada ly (mm); FC_{ly} = umidade da camada de solo na capacidade de campo na camada ly (mm); k_{sat} = condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h).

A vazão de retorno ou movimentação vertical de água livre ao longo dos macroporos até o horizonte do solo não saturado acontece quando formam rachaduras no fim do período de estiagem e início da temporada de chuvas, ou quando formam rachaduras causadas por atividades de cultivo agrícola (NEITSCH et al., 2011).

Segundo Neitsch et al. (2011), quando a vazão de retorno é modelada, o SWAT calcula o volume da rachadura da matriz do solo por camada, para cada dia de simulação. Se algum escoamento superficial for gerado, ele penetrará nas rachaduras. Se uma quantidade de água equivalente à capacidade total da rachadura existir no perfil do solo, ela poderá penetrar no perfil como uma vazão de retorno. Se o escoamento superficial for em excesso ao da capacidade da rachadura um fluxo permanece sobre terra. Para o presente estudo, essa vazão não foi considerada,

diante da dificuldade em obter um volume potencial da rachadura para perfil do solo. Neste caso:

$$w_{seep} = w_{perc,ly} \quad (40)$$

Em relação ao fluxo lateral, este é significativo em solos com uma camada superficial com alta condutividade hidráulica seguido de uma camada semi-impermeável ou impermeável rasas. Em tais sistemas, a água percola até atingir a camada impermeável e começa a formar uma zona saturada, que será a fonte do fluxo lateral subsuperficial. O modelo SWAT incorpora um modelo de armazenamento cinemático para o escoamento subsuperficial, baseado na equação do balanço de massa líquida onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle (equação 41) (NEITSCH et al., 2011).

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2SW_{ly,ex}K_{sat}slp}{\varphi_d L_{hill}} \right) \quad (41)$$

Em que, Q_{lat} = a descarga líquida no exutório no canal principal (mm/dia); L_{hill} = comprimento do canal principal (m); slp = declividade do canal principal; φ_d = porosidade do solo a qual está sujeita a drenagem (mm/mm).

3.5.1.5. Fluxo de água subterrânea (Q_{gw})

O balanço d'água para o aquífero raso é representado pela equação 42 e do aquífero profundo pela equação 43 (NEITSCH et al., 2011):

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - \omega_{pump,sh} \quad (42)$$

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - \omega_{pump,sh} \quad (43)$$

Em que, $aq_{sh,i}$ = quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm); $aq_{sh,i-1}$ = quantidade de água armazenada no aquífero no dia i-1 (mm); $w_{rchrg,sh}$ = quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia i (mm) (equação 44);

$$w_{rchrg,sh} = w_{rchrg,i} - w_{deep} \quad (44)$$

w_{deep} = quantidade de água que percola do aquífero raso para o aquífero profundo num dia i (mm) (equação 45);

$$w_{deep} = \beta_{deep} w_{rchrg,i} \quad (45)$$

$w_{rchrg,i}$ = quantidade de recarga em ambos aquíferos num dia i (mm) (equação 46);

$$w_{rchrg,i} = \left(1 - e^{-\frac{1}{\delta_{gw}}}\right) w_{inf} + e^{-\frac{1}{\delta_{gw}}} w_{rchrg,i-1} \quad (46)$$

β_{deep} = coeficiente de percolação do aquífero; δ_{gw} = tempo de atraso das formações geológicas sobrepostas (dias); $w_{rchrg,i-1}$ = quantidade de recarga em ambos aquíferos num dia $i-1$ (mm); Q_{gw} = fluxo de água subterrânea no dia i (mm); w_{revap} = quantidade de água que se move para dentro da zona de solo (fluxo ascendente) em resposta às deficiências de água no dia i (mm) (equação 47);

$$w_{revap} = \beta_{rev} E_o \quad (47)$$

β_{rev} = coeficiente de "revap"; $\omega_{pump,sh}$ = quantidade de água removida do aquífero raso por bombeamento no dia i (mm); $aq_{dp,i}$ = quantidade de água armazenada no aquífero profundo num dia i (mm); $aq_{dp,i-1}$ = quantidade de água armazenada no aquífero profundo num dia $i-1$ (mm);

Fluxo de base (Q_{gw}) é definido como o volume de fluxo fluvial originado da água subterrânea. O fluxo de base ocorre quando a água armazenada no aquífero raso excede um valor limite especificado pelo usuário (NEITSCH et al., 2011).

Para regime permanente:

$$Q_{gw} = \frac{8000K_{sat}}{L_{gw}^2} h_{wtbl} \quad (48)$$

Em que, L_{gw} = distância a partir da divisão do talvegue ou sub-bacia para o sistema aquífero em relação ao canal principal (m); h_{wtbm} = profundidade do lençol freático (m).

Para regime não permanente:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} e^{-\alpha_{gw}\Delta t} + w_{rchrg,sh} (1 - e^{-\alpha_{gw}\Delta t}), \quad se \ aq_{sh,i} > aq_{sh,q} \quad (49)$$

$$Q_{gw,i} = 0, \quad se \ aq_{sh,i} \leq aq_{sh,q} \quad (50)$$

Sendo, α_{gw} = constante da recessão do escoamento de base; Δt = intervalo de tempo (1 dia); $aq_{r,q}$ = limite do nível de água no aquífero raso para que possa ocorrer a contribuição das águas subterrâneas para o canal principal (mm).

3.5.2. Fase aquática

A fase aquática do SWAT é dividida em quatro componentes: água, sedimento, nutrientes e químicos orgânicos. O fluxo de água pode ser perdido por evaporação, transmissão através do leito do canal, remoção de água para agricultura ou outro uso antrópico. A vazão pode ser incrementada pela chuva ou adição de efluentes. A propagação de água através do canal é modelada pelo método do armazenamento variável, desenvolvido por Williams (1969) ou pelo método de Muskingum (NEITSCH et al., 2011).

O método de Muskingum de direcionamento modela o volume de armazenamento em um comprimento de canal como uma combinação do armazenamento do prisma e cunha. Quando uma onda de inundação avança para um seguimento do rio, o fluxo de entrada excede o fluxo de saída, uma cunha em armazenamento é produzida. A medida que a onda de inundação retrai, o fluxo de saída excede o de entrada no seguimento do rio e uma cunha negativa é produzida. Além do armazenamento em cunha, o seguimento do rio contém um prisma de armazenamento formado por um volume da seção transversal constante ao longo do rio. Assume-se que a área da seção transversal do fluxo é diretamente proporcional à descarga para um dado seguimento de rio (NEITSCH et al., 2011).

$$V = Kq_{out} + Kx(q_{in} - q_{out}) \text{ ou } V = K(xq_{in} + (1 - x)q_{out}) \quad (51)$$

Sendo, K = constante de tempo de armazenamento para o rio (s); X = fator de ponderação (armazenamento tipo reservatório = 0, cunha cheia = 0,5, rio = 0,2).

$$q_{out,2} = C_1q_{in,2} + C_2q_{in,1} + C_3q_{out,1} \quad (52)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2Kx}{2K(1 - x) + \Delta t} \quad C_2 = \frac{\Delta t + 2Kx}{2K(1 - x) + \Delta t} \quad C_3 = \frac{2K(1 - x) - \Delta t}{2K(1 - x) + \Delta t} \quad (53)$$

Para manter a estabilidade numérica e evitar computação de fluxos de saída negativos, a condição deve ser realizada:

$$2Kx < \Delta t < 2K(1 - x) \quad (54)$$

$$K = \text{coef}_1 K_{\text{full}} + \text{coef}_2 K_{0,1\text{full}} \quad (55)$$

$$K_{\text{full}} = \frac{1000L_{\text{ch}}}{c_k} \quad (56)$$

$$c_k = \frac{5}{3} \left(\frac{Rh_{\text{ch}}^{2/3} slp_{\text{ch}}^{1/2}}{\eta} \right) = \frac{5}{3} v_c \quad (57)$$

Sendo, x = dado pelo usuário; coef_1 e coef_2 = coeficientes de ponderação dados pelo usuário; K_{full} = constante do tempo de armazenamento para calhas cheias (s); $K_{0,1\text{full}}$ = constante do tempo de armazenamento para 1/10 do fluxo das calhas (s); c_k = celeridade correspondente ao fluxo para uma dada profundidade (m/s).

3.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade dos dados de saída de um modelo tem por objetivo quantificar a importância relativa de cada parâmetro de entrada na determinação do valor de uma variável de saída (HOMMA; SALTELLI, 1996). A análise de sensibilidade global avalia aleatoriamente ou sistematicamente todo o intervalo de valores de um parâmetro e as combinações que podem existir entre os diferentes parâmetros (VAN GRIENSVEN, et al., 2006).

A sensibilidade dos parâmetros do SWAT pode ser realizada por meio do algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting Version 2* (SUFI2) executado pelo *software* gratuito *SWAT Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP).

A sensibilidade dos parâmetros é computada por meio do cálculo do sistema de regressão múltipla representado pela equação 58, que regressa os valores dos parâmetros gerados pela amostragem por hipercubo latino versus os valores da função objetivo (ABBASPOUR, et al., 2007).

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (58)$$

Em que, g é a variável dependente; b_i é a variável independente (parâmetros); α corresponde a um coeficiente técnico fixo, a um valor de base a partir do qual começa g ; β_i corresponde ao coeficiente técnico atrelado à variável b_i ; e m é igual ao número de parâmetros.

A sensibilidade é estimada da média das variações na função objetivo, resultante das mudanças em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados. A sensibilidade dos parâmetros é avaliada pelos valores de *t-stat* e *p-value*, quanto maior o valor absoluto de *t-stat* e o menor o valor de *p-value*, mais sensível é o parâmetro (ABBASPOUR, et al., 2007).

O *t-stat* é o coeficiente de regressão de um parâmetro dividido pelo seu erro padrão, de forma que se o valor do coeficiente é maior que seu erro padrão, então o valor de *t-stat* é maior que zero, logo, o parâmetro é sensível. Para calcular o *p-value* é necessário comparar o valor de *t-stat* com os valores da tabela de distribuição de *t* de *Student*. O *p-value* para cada parâmetro testa a hipótese nula de que o coeficiente de regressão é igual a zero. Um valor pequeno de *p-value* ($<0,05$) indica que podemos rejeitar a hipótese nula, ou seja, o parâmetro exerce influência na variável dependente, sendo, portanto, sensível. O valor 0,05 indica que existe a probabilidade de 95% da variável dependente estar sofrendo algum efeito com a mudança do valor do parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

3.7. CALIBRAÇÃO

O modelo de calibração é um processo de estimativa de valores de parâmetros através da comparação dos valores simulados por um modelo com dados observados para uma mesma condição (MORIASI, et al., 2007).

A calibração automática requer uma função objetivo que consiste de uma equação utilizada para medir a "distância" entre os dados de saída do modelo e os valores observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999).

De acordo com Moriasi *et al.* (2007), as principais funções objetivos utilizadas em modelos hidrológicos são:

- Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE): verifica o ajuste dos picos de vazão, varia de 1 até $-\infty$, sendo COE igual a 1 uma simulação perfeita do modelo, COE igual a zero indica que os valores simulados são iguais as médias dos valores medidos, e COE negativo demonstra uma simulação inadequada;

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (59)$$

- PBIAS (Percentagem bias): calcula a tendência da média dos dados simulados ser maior ou menor que os dados observados;

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s) * 100}{\sum_{i=1}^n (E_m)} \quad (60)$$

- RSR = RMSE (*Root Mean Square Error*)/STDEV: raiz do erro quadrático médio, mais sensível para vazão máxima;

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2}} \quad (61)$$

Nas expressões 59, 60 e 61: E_m = evento monitorado; E_s = evento simulado; n = número de eventos; \bar{E} = média de eventos monitorados.

Moriasi *et al.* (2007) apresenta, por meio da Tabela 5, a relação de valores classificados como muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório para cada coeficiente utilizado na calibração de modelos hidrológicos.

Tabela 5 - Valores dos coeficientes com relação a performance da calibração para modelagem de produção de água.

Classificação	COE	PBIAS	RSR
Muito boa	0,75 a 1,00	$< \pm 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$
Boa	0,65 a 0,75	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$	$0,50 < RSR \leq 0,60$
Satisfatória	0,50 a 0,65	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$	$0,60 < RSR \leq 0,70$
Insatisfatória	$< 0,50$	$PBIAS > \pm 25$	$RSR > 0,70$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al (2007).

A calibração dos dados simulados pelo SWAT, neste trabalho, será realizada por meio do algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting Version 2* (SUF12) executado pelo *software SWAT Calibration and Uncertainty Program* (SWAT-CUP).

O primeiro passo da calibração pelo algoritmo SUFI2 consiste em definir a função objetivo, em seguida estabelecer as faixas mínimas e máximas para os parâmetros que serão otimizados. Os intervalos de incerteza iniciais são atribuídos próximos aos valores dos parâmetros para a primeira rodada da amostragem pelo hipercubo latino, assim essa amostragem é realizada levando a n interações, ou seja, n combinações de valores dos parâmetros. Em seguida avalia as interações por meio da função objetivo e então uma série de medidas é calculada para avaliar cada rodada de amostragem. Por fim, a avaliação das incertezas é calculada considerando os 95% de previsão de incertezas para todas as variáveis na função objetivo. Inicialmente as incertezas dos parâmetros são altas na primeira interação, por isso, novas interações são necessárias com novos intervalos para cada parâmetro (ABBASPOUR, et al., 2007).

4. METODOLOGIA

4.1. REGIÃO DE ESTUDO

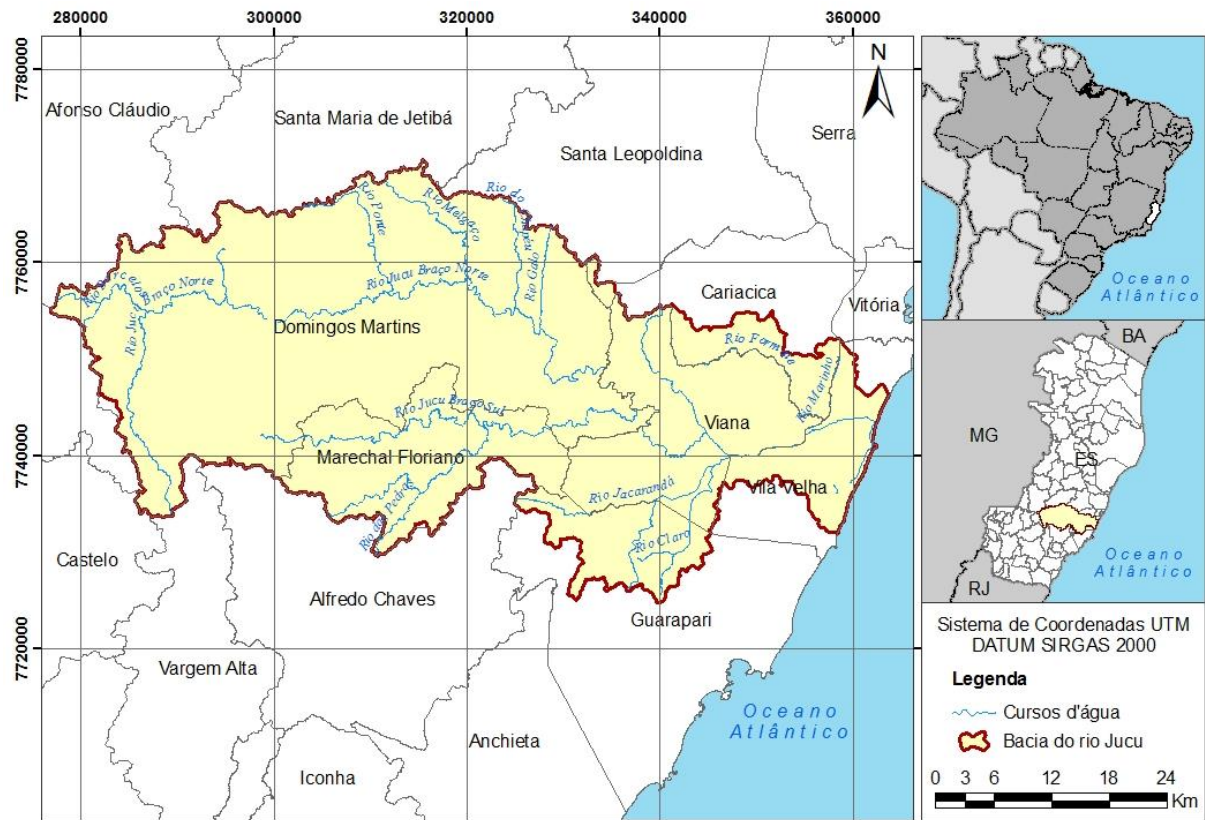
O estudo abrangeu a bacia hidrográfica do rio Jucu, localizada na porção sudeste do estado do Espírito Santo, com uma área de 2.183 Km², cuja extensão de seus cursos d'água é de aproximadamente 5.130 Km, sendo a densidade de drenagem de 2,54 Km/Km².

A bacia hidrográfica abrange parcial ou totalmente os municípios de Domingos Martins, Marechal Floriano, Viana, Vila Velha, Cariacica e Guarapari. Os municípios de Domingos Martins, Marechal Floriano e Viana são totalmente abrangidos pela bacia hidrográfica. O primeiro corresponde a aproximadamente 60% da área total da bacia hidrográfica, o segundo 14,5% e o terceiro 13%. Limita-se a Leste com o Oceano Atlântico, ao Norte com a bacia do rio Santa Maria da Vitória, à noroeste com a bacia do rio Guandú, a Sudoeste e ao Sul com a bacia do rio Itapemirim.

Os cursos d'água que compõem a bacia hidrográfica do rio Jucu são: os rios Jucu Braço Norte, Jucu Braço Sul, Formate, Marinho, Jacarandá, Clarinho, Claro, das Pedras, Galo, Melgaço, Ponte, Barcelona, ribeirão D'Anta, dentre outros. O rio Jucu Braço Sul nasce no interior do Parque Estadual da Pedra Azul, percorre o município de Marechal Floriano e deságua no rio Jucu na divisa entre os municípios de Viana e Domingos Martins. O rio Jucu Braço Norte nasce a aproximadamente 1200 m acima no nível do mar, próximo ao Parque Estadual de Pedra Azul, e seu curso se desenvolve por aproximadamente 168 Km até desaguar no município de Vila Velha, na praia da Barra do Jucu. De sua extensão total, cerca de 123 Km compreendem o trecho conhecido como Braço Norte, enquanto os 45 Km restantes correspondem ao trecho do rio Jucu desde a confluência do Braço Sul até a foz.

Na Figura 2 é mostrado o mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Jucu, destacando seus principais cursos d'água, assim como os municípios pertencentes.

Figura 2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: Autoria própria.

4.2. VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO

O modelo SWAT requer dados de entrada correlacionados com as características fisiográficas e climáticas da bacia hidrográfica em estudo. Esses dados foram inseridos no modelo por meio da interface ArcSWAT, a qual permite que o SWAT funcione acoplado ao ArcMap, principal componente do ArcGIS, desenvolvido pelo *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*.

O modelo SWAT-CUP, usado no processo de calibração, requer como dados de entrada os de saída do SWAT e dados monitorados para realização do ajuste. Neste estudo, foram inseridas as vazões estimadas pelo SWAT e as vazões monitoradas por estações fluviométricas presentes na bacia hidrográfica do estudo.

O Quadro 1 relaciona cada dado de entrada com seu respectivo tipo de arquivo a ser lido pelo modelo, além da origem desse arquivo.

Quadro 1 - Descrição do tipo e origem do arquivo referente a cada parâmetro de entrada.

Dado de entrada	Tipo de arquivo	Origem do arquivo
Topografia	Modelo Digital de Elevação (MDE)	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> (ASTER, 2011)
Pedologia	<i>Raster</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1978)
Uso do solo	<i>Raster</i>	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA, 2007)
Temperatura	Dados alfanuméricos	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2016)
Radiação solar	Dados alfanuméricos	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2016)
Velocidade do vento	Dados alfanuméricos	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2016)
Umidade relativa do ar	Dados alfanuméricos	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2016)
Pluviosidade	Dados alfanuméricos	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2016) e Agência Nacional de Águas (ANA, 2016)
Vazões	Dados alfanuméricos	Agência Nacional de Águas (ANA, 2016)

Fonte: Autoria própria.

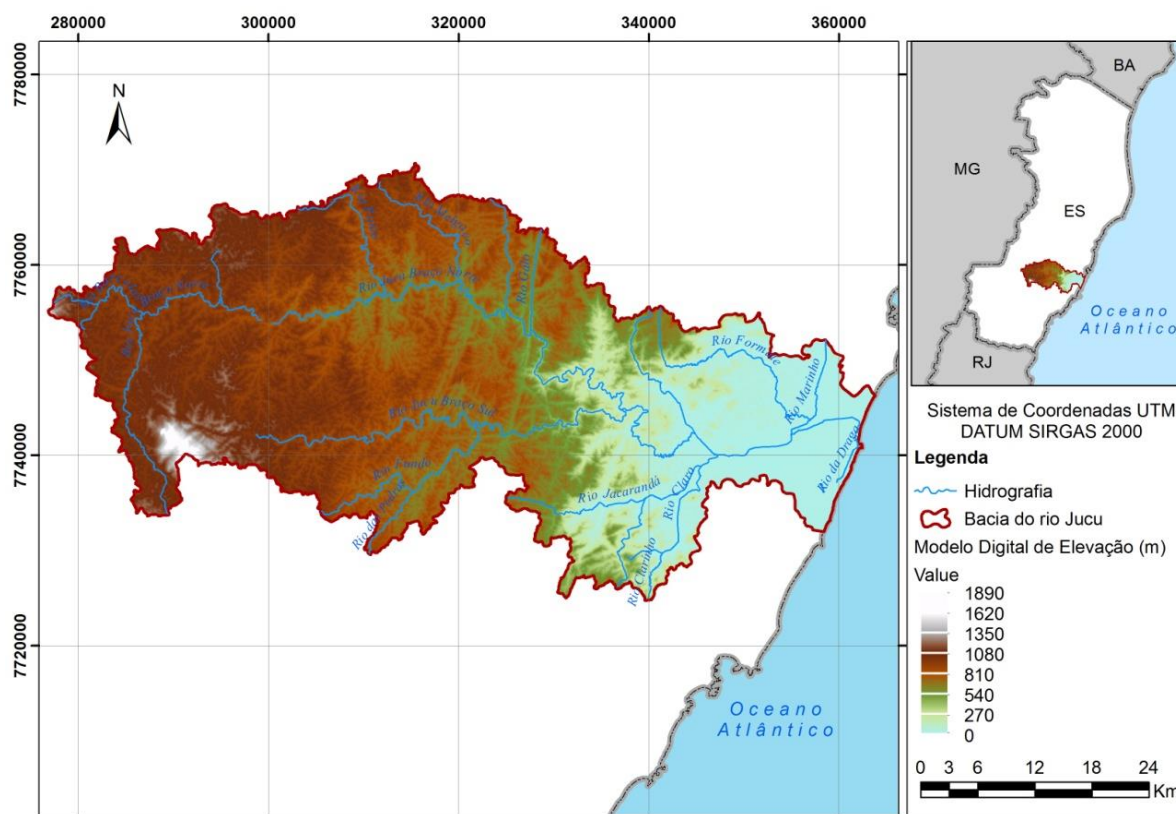
4.2.1. Variáveis fisiográficas

As variáveis fisiográficas, necessárias à modelagem por meio do SWAT, referem-se aos dados de altitude, pedologia e uso do solo.

A altitude da bacia hidrográfica em estudo foi lida pelo modelo através de um arquivo de imagem das elevações do terreno denominado Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 30 metros, adquirido pelo *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), desenvolvido em outubro de 2011, conjuntamente pelo *Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan* (METI) e pela *United States National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

Na Figura 3 é apresentado o MDE da bacia hidrográfica do rio Jucu, destacando seus principais cursos d'água.

Figura 3 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: Autoria própria.

As informações pedológicas da bacia hidrográfica do rio Jucu são provenientes de uma base de dados na escala 1:400.000 do levantamento realizado em todo estado do Espírito Santo pela EMBRAPA em 1978. Os solos pertencentes à região de estudo e suas respectivas porcentagens de área são apresentados na Tabela 6 e ilustrados na Figura 4.

Tabela 6 - Pedologia da bacia hidrográfica do rio Jucu (continua).

Nome do solo	Sigla	Porcentagem de área
Latossolo vermelho amarelo distrófico A moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia relevo forte ondulado	LVd2	6.10%
Latossolo vermelho amarelo distrófico A moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia relevo montanhoso e forte ondulado	LVd3	67.53%
Latossolo vermelho amarelo distrófico A moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia relevo suave ondulado	LVd12	1.87%
Cambissolo háplico distrófico A moderado textura argilosa e média fase floresta perenifólia relevo montanhoso e forte ondulado	Cd1	14.74%

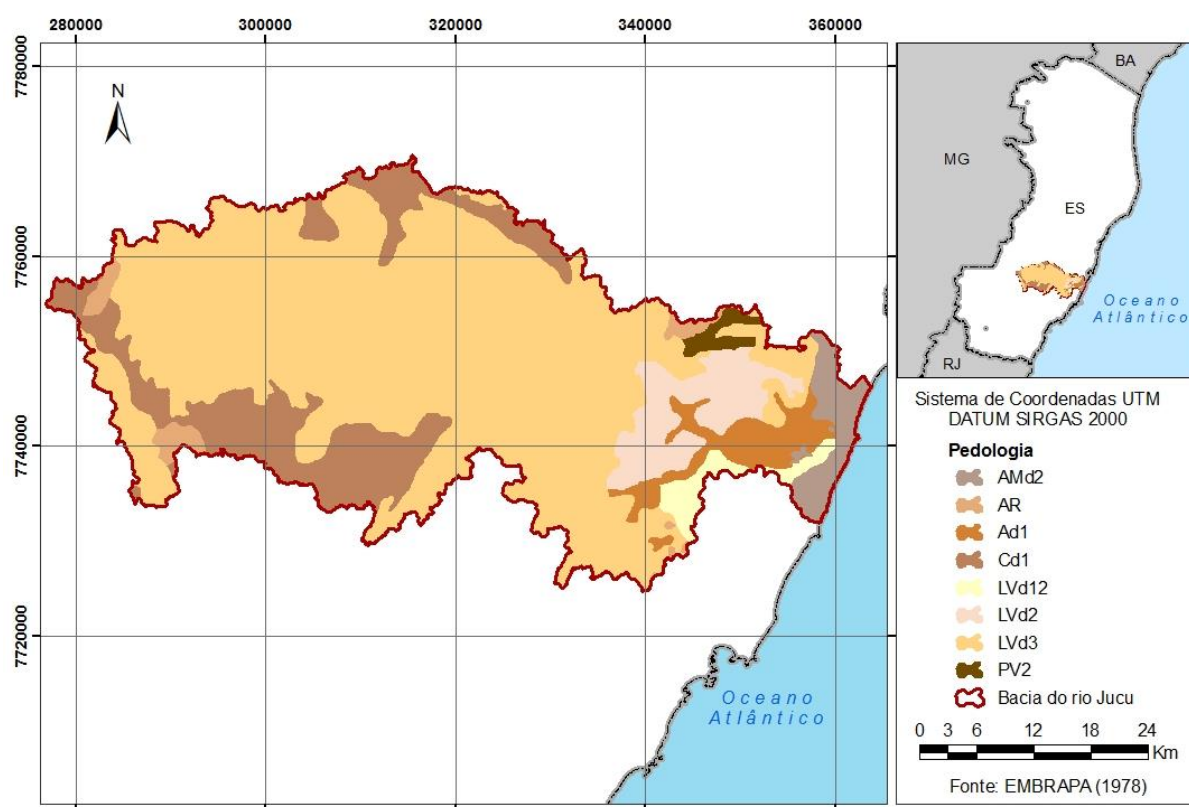
Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Pedologia da bacia hidrográfica do rio Jucu (conclusão).

Nome do solo	Sigla	Porcentagem de área
Argissolo vermelho amarelo álico A moderado textura argilosa fase floresta subcaducifolia relevo ondulado	PV2	0.89%
Neossolo quartzarênico distrófico A moderado fase arenosa floresta subperenifólia de restinga relevo plano	AMd2	3.08%
Neossolo flúvico distrófico A fraco e moderado textura média fase floresta perenifólia de várzea relevo plano	Ad1	4.07%
Neossolo litólico eutrófico A moderado textura média e argilosa floresta subperenifólia e subcaducidólia relevo escarpado, montanhoso e forte ondulado	AR	1.73%

Fonte: Autoria própria.

Figura 4 - Mapa de pedologia da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: Autoria própria.

Tendo em vista que o banco de dados do SWAT apresenta valores de parâmetros de acordo com as características pedológicas da América do Norte, é necessário incluir os tipos de solo da bacia hidrográfica em estudo, acompanhados de suas características pedológicas neste banco de dados para os parâmetros relacionados à produção de água.

Os valores para cada parâmetro foram obtidos, para cada horizonte do solo, por meio das amostragens realizadas pelo levantamento de reconhecimento de solos da EMPRAPA no estado do Espírito Santo em 1978 e por Tucci (2014). A definição de cada parâmetro relacionado à produção de água é descrita a seguir:

- NLAYERS - número de horizontes do solo;
- HYDGRP - grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D);
- SOL_Z - profundidade de cada horizonte (mm);
- SOL_BD - densidade do solo (g/cm^3);
- SOL_AWC - quantidade de água disponível para as plantas (mm/mm);
- SOL_K - condutividade hidráulica do solo (mm/h);
- CLAY - porcentagem de argila no solo (%);
- SAND - porcentagem de areia no solo (%);
- SILT - porcentagem de silte no solo (%);
- ROCK - porcentagem de cascalho no solo (%);
- SOL_ALB - albedo do solo.

O parâmetro HYDGRP foi obtido através da classificação de Tucci (2014), apresentada no Quadro 2. A descrição de cada grupo hidrológico se encontra no item 3.5.1.2 dessa dissertação.

Quadro 2 - Classificação pedológica nos grupos hidrológicos de solo A, B, C e D (continua).

Grupo hidrológico do solo	Classes Gerais de solo
A	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZÊNICO; ARGILOSSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa, argilosa/muito argilosa, que não apresentam mudança textural abrupta.
C	ARGILOSSOLOS pouco profundos, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGILOSSOLO VERMELHO, ARGILOSO; VERMELHO AMARELO e ARGILOSSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS; ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.

Fonte: Tucci (2014).

Quadro 2 - Classificação pedológica nos grupos hidrológicos de solo A, B, C e D (conclusão).

Grupo hidrológico do solo	Classes Gerais de solo
D	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no grupo C; ARGILOSSOLO VERMELHO AMARELO e ARGILOSO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Tucci (2014).

O parâmetro SOL_AWC foi obtido através dos valores de umidade equivalente para cada tipo do solo em EMBRAPA (1978). De acordo com Dias Junior, Bertoni e Bastos (2000), a umidade equivalente (UE) do solo corresponde a umidade que uma amostra de solo retém quando, depois de saturada, é submetida a centrifugação por 30 minutos, com velocidade 1000 vezes maior que a gravidade, e que através dela pode ser estimada a capacidade de campo (FC) e a fração de água no ponto de murcha permanente (WP) pelas equações 62 e 63.

$$WP = 0,68 * UE \quad (62)$$

$$FC = 1,3 * UE \quad (63)$$

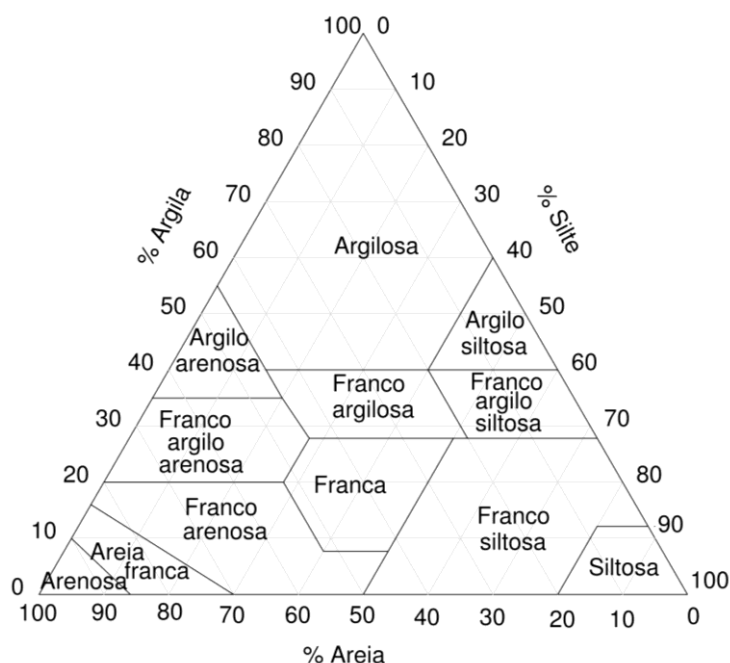
Como exposto no item 3.5.1.2 dessa dissertação, a quantidade de água disponível para as plantas, que corresponde ao parâmetro SOL_AWC, é a subtração do valor da capacidade de campo (FC) pelo valor da fração de água no ponto de murcha permanente (WP). Dessa forma, o parâmetro SOL_AWC pode ser estimado pela expressão 64.

$$SOL_AWC = 1,3 * UE - 0,68 * UE \quad (64)$$

Os parâmetros SOL_Z, SOL_BD, CLAY, SAND, SILT e ROCK foram obtidos diretamente pelas amostragens do levantamento de reconhecimento de solos da EMBRAPA. Já o parâmetro SOL_K foi estimado com base na textura.

As texturas dos solos foram obtidas através do triângulo textural desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Triângulo textural do solo.



Fonte: Adaptado de SCS (1987).

Os cantos do triângulo textural representam 100% de areia, argila ou silte, como indicado na Figura 5. As porcentagens de cascalho e material orgânico não estão incluídas. O triângulo é dividido em porções de 10% de argila, silte e areia, e as linhas espessas mostram a divisão entre 12 classes texturais de solos. Se a porcentagem de areia, argila e silte são conhecidas para cada tipo de solo, então a classe textural pode ser determinada (SCS, 1987).

A partir da textura do solo foi obtido o parâmetro SOL_K (condutividade hidráulica) através da Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação textural e condutividade hidráulica.

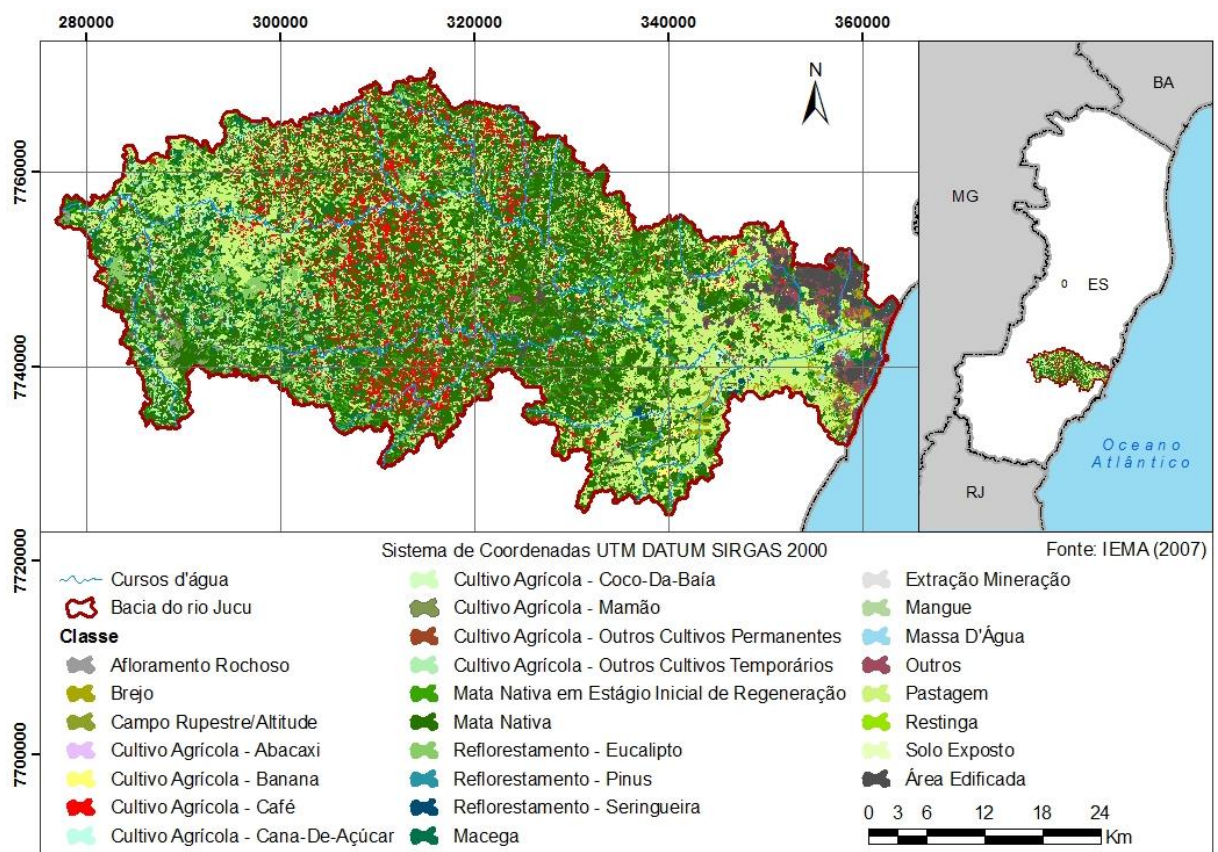
Textura	Condutividade hidráulica (mm/h)
Arenosa	250 - 500
Areia franca	120 - 250
Franco-arenosa	60 - 120
Franco-argilosa, silte, franco-siltosa, franca	20 - 60
Argila, argilo-siltosa, argilo-arenosa, franco-argilo-siltosa, franco-argilosa, franco-siltosa, silte, franco-argilo-arenosa	5 - 20
Argila, franco-argilosa, argilo-siltosa, franco-argilo-arenosa	2,5 - 5
Argila	< 2,5

Fonte: Adaptado de Dent e Young (1981), **apud** Baldissera (2005).

Para o parâmetro SOL_ALB (albedo do solo) foi atribuído o valor de 0,15, considerando intervalo de 0 a 0,25 do SWAT e sendo um dos parâmetros de calibração, ou seja, seus valores sofrerão alterações.

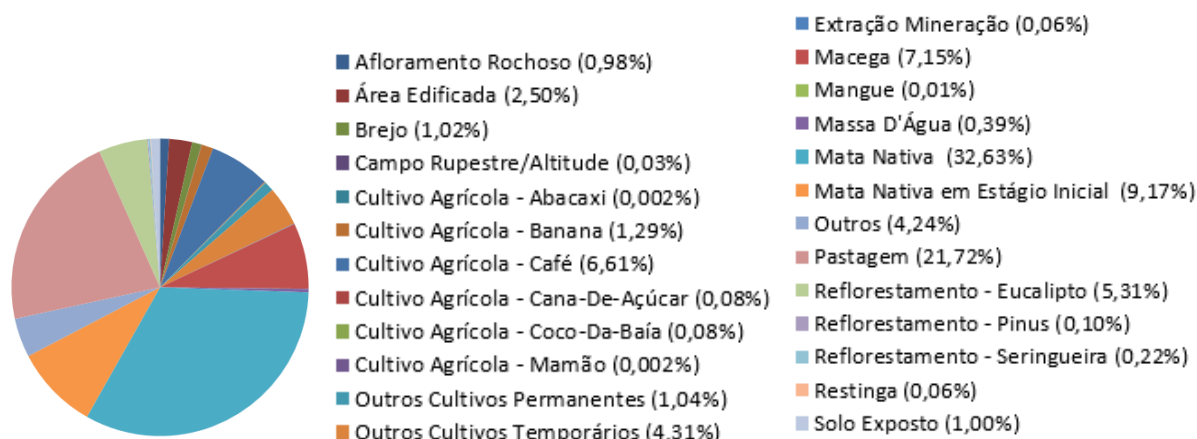
Para confecção do mapa de uso e ocupação do solo atual da bacia hidrográfica em estudo da Figura 6, foram utilizados os *shapefiles* disponibilizados do IEMA (2007). A Figura 7 apresenta o gráfico destacando o percentual de cada tipo de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica em estudo.

Figura 6 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 - Percentuais de área de cada uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 7, mais de 40% da área territorial da bacia hidrográfica do rio Jucu é ocupada por mata nativa, e cerca de mais de 8% por reflorestamento com espécies eucalipto, pinus e seringueira. Destaca-se, também, uma área significativa de pastagem, cerca de quase 30% da bacia hidrográfica. A área edificada representa a zona urbana da bacia hidrográfica, e está concentrada nas Sedes Municipais de Cariacica e Vila Velha, as quais apresentam maior índice de urbanização que os demais municípios da bacia hidrográfica do rio Jucu.

Para cada informação de uso do solo foram atribuídos parâmetros para a estimativa de vazão no SWAT, os quais foram usados dados norte americanos devido à ausência de dados locais, exceto para o valor de CN para cada grupo hidrológico A, B, C e D (CN2A, CN2B, CN2C e CN2D). A definição de cada parâmetro é descrita a seguir:

- BLAI - índice máximo de área foliar;
- FRGRW1 - fração de potenciais de unidades de calor acumuladas para a planta em um determinado dia na fase vegetativa;
- FRGRW2 - fração da fase vegetativa do 2º ponto da curva de desenvolvimento ideal da área foliar
- DLAI - fração da fase vegetativa na qual a senescência se torna o processo de crescimento dominante;
- CHTMX - altura máxima do dossel;
- GSI – máxima condutância estomática na alta radiação solar e baixo déficit de pressão de vapor;

- VPDFR – déficit de pressão de vapor;
- OV_N – valor de Manning;
- CN2A – CN na condição 2 do solo A;
- CN2B – CN na condição 2 do solo B;
- CN2C – CN na condição 2 do solo C;
- CN2D – CN na condição 2 do solo D;
- ALAI_MIN – índice de área mínima foliar;
- BIO_LEAF – fração da biomassa acumulada no vegetal;
- BM_DIEOFF – fração de biomassa morta.

A atribuição dos valores de CN consistiu na correlação entre as classes de uso do solo disponíveis no plano de informação e as classes das Tabelas 1 e 2 do SCS, de forma a obter a classificação que melhor representasse cada uso do solo da região de estudo (Tabela 8).

Tabela 8 - Valores de CN para uso do solo da região de estudo (continua).

Uso do solo (IEMA)	Uso do solo (Livre tradução das tabelas do SCS)	A	B	C	D
Afloramento rochoso	Área impermeável	98	98	98	98
Massa d'água	Área impermeável	92	92	92	92
Área edificada	Zonas residenciais com lote até 500 m ²	77	85	90	92
Extração mineral	Solo descoberto	77	86	91	94
Solo exposto	Solo descoberto	77	86	91	94
Cultivo Agrícola - Banana	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Cultivo Agrícola - Coco da Baía	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Cultivo Agrícola - Café	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Cultivo Agrícola - Cana de açúcar	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Cultivo Agrícola - Abacaxi	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Permanentes	Pomares (condições hidrológicas razoáveis)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Temporários	Plantações de legumes em curva de nível (condições hidrológicas boas)	55	69	78	83
Mata nativa	Matas protegidas (condições hidrológicas boas)	30	55	70	77

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Valores de CN para uso do solo da região de estudo (conclusão).

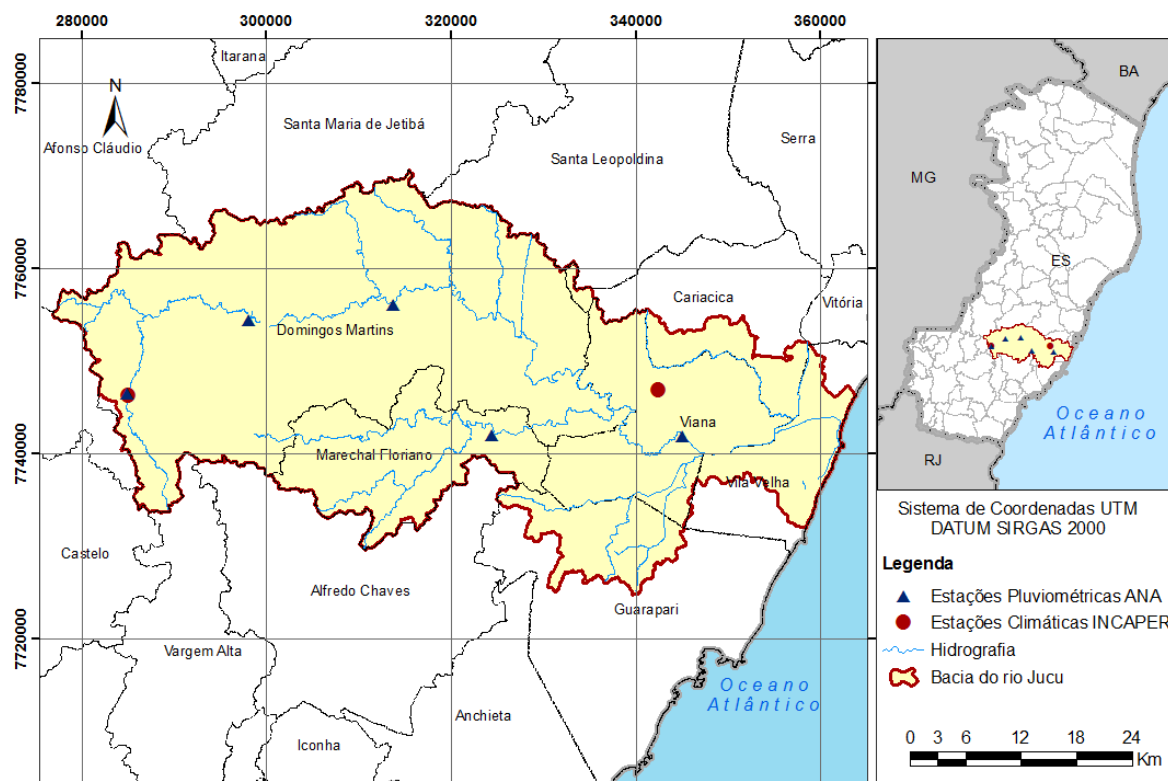
Uso do solo (IEMA)	Uso do solo (Livre tradução das tabelas do SCS)	A	B	C	D
Mata nativa em estágio inicial de regeneração	Matas roçadas, mas não queimadas (condições hidrológicas razoáveis)	36	60	73	79
Restinga	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Brejo	Pastagem 50% a 75% de cobertura do solo (condições hidrológicas razoáveis)	49	69	79	84
Mangue	Detritos de florestas, árvores pequenas (condições hidrológicas pobres)	45	66	77	83
Pastagem	Pastagem 50% a 75% de cobertura do solo (condições hidrológicas razoáveis)	49	69	79	84
Macega	Terreno com ervas daninhas 50% a 75% de cobertura do solo (condições hidrológicas razoáveis)	35	56	70	77
Campo rupestre/altitude	Terreno com ervas daninhas > 75% de cobertura do solo (condições hidrológicas razoáveis)	30	48	65	73
Reflorestamento - Eucalipto	Matas roçadas, mas não queimadas (condições hidrológicas razoáveis)	36	60	73	79
Reflorestamento - Pinos	Matas protegidas (condições hidrológicas boas)	30	55	70	77
Reflorestamento - Seringueira	Matas protegidas (condições hidrológicas boas)	30	55	70	77
Outros	Chácaras, construções estradas, lotes	59	74	82	86

Fonte: Autoria própria.

4.2.2. Variáveis climáticas

Os dados climáticos usados pelo modelo SWAT foram disponibilizados pelo setor de hidrometeorologia do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER) e pela Agência Nacional de Águas (ANA). Estes dados referem-se à radiação solar (Kj/m^2), à precipitação pluviométrica (mm), às temperaturas máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$), à umidade relativa do ar (%) e à velocidade do vento (m/s). Foram selecionadas estações dentro da bacia de forma a obter o maior número possível de dados. A estação climática, o responsável pelos dados, as coordenadas da estação, o tipo de dado e a respectiva série histórica estão dispostos na Tabela 9, por sua vez, a localização das estações climáticas estão apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Mapa de localização das estações climáticas na bacia hidrográfica do rio Jucu.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Dados climáticos de entrada do modelo SWAT.

Estação climática	Responsável	Coordenadas		Tipo de dado	Série histórica
		Latitude	Longitude		
Domingos Martins	INCAPER	20,37 S	41,06 W	Precipitação	1984 - 2015
				Temperatura	1984 - 2015
				Velocidade do vento	1992 - 2015
				Radiação solar	2012 - 2015
				Umidade relativa	1984 - 2015
Viana	INCAPER	20,37 S	40,51 W	Precipitação	1984 - 2015
				Temperatura	1984 - 2015
				Umidade relativa	1984 - 2015
Arace	ANA	20,37 S	41,06 W	Precipitação	1984 - 2015
Fazenda Jucuruaba		20,42 S	40,49 W	Precipitação	1984 - 2015
Marechal Floriano		20,38 S	41,42 W	Precipitação	1984 - 2015
Perobinha		20,28 S	40,78 W	Precipitação	1984 - 2015
São Rafael		20,30 S	40,93 W	Precipitação	1984 - 2015

Fonte: Autoria própria.

Para o preenchimento de falhas, o SWAT requer que sejam definidos valores estatisticamente representativos das séries temporais das estações meteorológicas. Estes parâmetros, descritos a seguir, são utilizados no gerador de clima:

- TMPMX - média das temperaturas máximas diárias a cada mês (°C);
- TMPMN - média das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C);
- TMPSTDMX - desvio padrão das temperaturas máximas diárias a cada mês (°C);
- TMPSTDMN - desvio padrão das temperaturas mínimas diárias a cada mês (°C);
- PCPMM - média da precipitação mensal total para o período (mm);
- PCPSTD - desvio padrão das precipitações a cada mês (mm/dia);
- PCPSKW - coeficiente assimétrico para a precipitação diária a cada mês;

$$PCPSKW = \frac{N \sum_{d=1}^N (R_{dia,mês} - PCPMM)^3}{(N-1)(N-2)(PCPSTD)} \quad (65)$$

- PR_W1 - probabilidade de um dia úmido seguir um dia seco no mês;

$$PR_W1 = \frac{dias_{U/S,i}}{dias_{S,i}} \quad (66)$$

- PR_W2 - probabilidade de um dia úmido seguir um dia úmido no mês;

$$PR_W2 = \frac{dias_{U/U,i}}{dias_{U,i}} \quad (67)$$

- PCPD - média do número de dias com precipitação no mês;

$$PCPD = \frac{dias_{U,i}}{anos} \quad (68)$$

- RAINHHMX - precipitação máxima para meia hora de chuva em todo o período de registro para o mês (mm);
- SOLARAV - média da radiação solar diária para cada mês (MJ/m².dia);
- DEWPT - média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês (°C) ou da umidade relativa;
- WNDAY - média das velocidades de vento diárias para cada mês (m/s).

Nas expressões 65, 66, 67 e 68:

N = total do número de dias com registro de precipitação para o mês;

$R_{dia,mês}$ = quantidade de precipitação registrada no dia d no mês (mm);

$dias_{U/S,i}$ = número de vezes que o dia úmido seguiu um dia seco no mês i ;

$dias_{S,i}$ = número de dias secos no mês i ;

$dias_{U/U,i}$ = número de vezes que o dia úmido seguiu um dia úmido no mês i ;

$dias_{U,i}$ = número de dias úmidos no mês i ;

$anos$ = número de anos registrados.

A determinação da precipitação máxima de meia hora para cada mês envolveu a conversão das alturas pluviométricas dos registros diários para duração de 24 horas, em seguida, de 24 horas para 1 hora, e por fim, de 1 hora para 30 minutos. Os fatores de conversão estão elencados na Tabela 10.

Tabela 10 - Relação entre as alturas pluviométricas.

Relação entre as alturas pluviométricas	Fatores de conversão
30 min / 1 h	0,74
1 h / 24 h	0,42
6 h / 24 h	0,72
8 h / 24 h	0,78
10 h / 24 h	0,82
12 h / 24 h	0,85
24 h / 1 dia	1,14

Fonte: Adaptado de CETESB (1986).

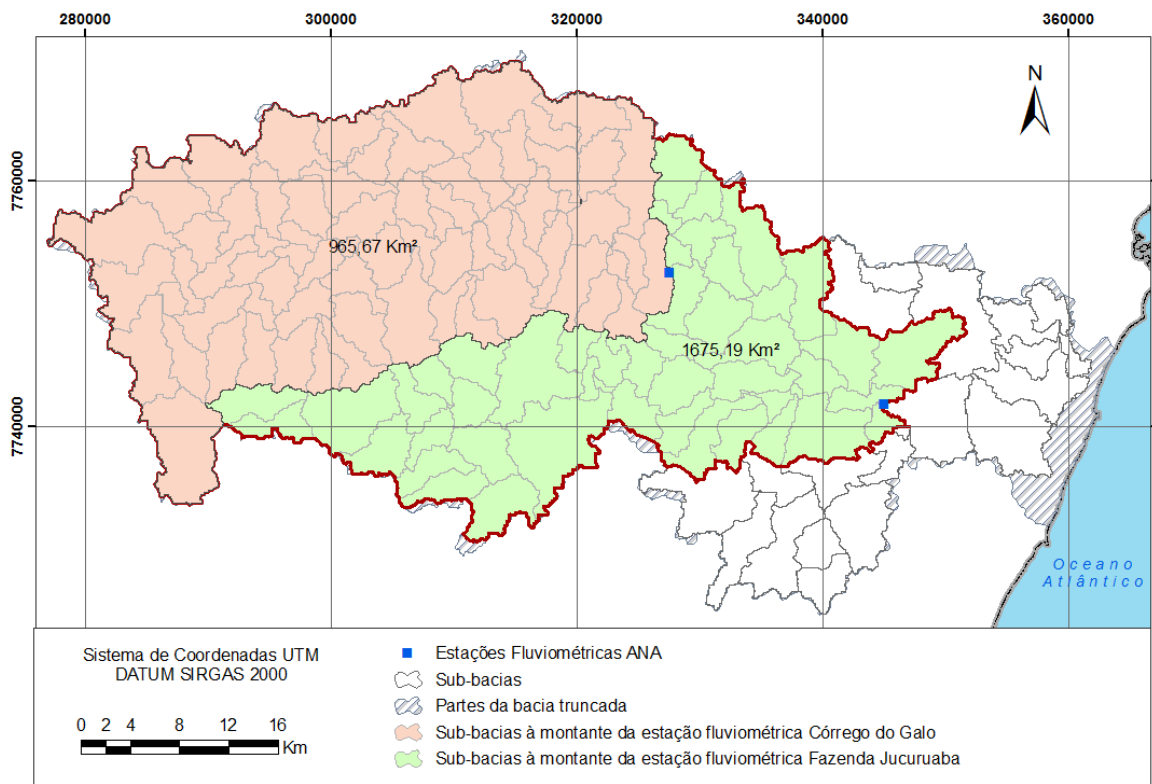
4.2.3. Variáveis fluviométricas

Os testes de análise de sensibilidade e de calibração, por meio do *software* SWAT-CUP, foram desenvolvidos com os dados de vazões das estações fluviométricas sob código 57230000, denominada Fazenda Jucuruaba, e sob código 57170000, denominada Córrego do Galo, ambas de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

(CPRM). A série de vazões disponíveis para cada estação é de 32 anos, de 1984 a 2015.

A estação Fazenda Jucuruaba é localizada mais a jusante e abrange uma área de drenagem de 1675,19 Km², e a estação Córrego do Galo abrange uma área de drenagem de 965,67 Km², como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Localização das estações fluviométricas.



Fonte: Autoria própria.

4.3. PROCESSAMENTO DO MODELO SWAT

O primeiro passo da modelagem SWAT consistiu no delineamento da bacia hidrográfica, obtido através do modelo digital de elevação, calculando-se a direção do fluxo de drenagem, o fluxo de drenagem acumulado, os limites da bacia hidrográfica, a rede de drenagem e as respectivas sub-bacias hidrográficas com seus exutórios.

Na próxima etapa foram definidas as unidades de resposta hidrológica (*hydrologic response units* – HRU) por meio do cruzamento dos mapas pedológico, de uso e

ocupação do solo e das classes de declividades. As HRU's são unidades de área em que coincidem os mesmos tipos de solo, uso do solo e declividade.

Após definição das HRU's, procedeu com a inserção de dados climatológicos de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento, assim como, os valores dos parâmetros estatísticos climáticos, definidos no item 4.2.2, responsáveis pela geração de dados para preenchimento das falhas.

A última etapa de processamento no SWAT foi a simulação onde foram definidos o período de aquecimento, o período de simulação, passo de tempo da simulação, podendo ser diário, mensal ou anual, e os dados de saída de interesse. O período de aquecimento é necessário, pois há algumas incertezas sobre o estado do sistema, devido ao desconhecimento de todas as suas condições iniciais. Trata-se de uma parcela inicial do tempo de simulação que será excluída do resultado final.

Uma vez determinados os dados de saída, procedeu-se com a análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à produção de água na bacia hidrográfica para posterior calibração dos dados, executados pelo *software* SWAT-CUP.

4.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Antes da calibração do modelo, foi necessária a análise de sensibilidade, pelo fato de existir uma série de parâmetros de entrada operados pelo modelo, sendo que apenas alguns possuem real relevância para a calibração e para os respectivos dados de saída para uma determinada condição de simulação. Dessa forma, a análise de sensibilidade classificou os parâmetros que podem ser ajustáveis de acordo com o grau de impacto sobre a variável hidrológica do modelo influenciada pelo parâmetro.

A análise foi executada pelo *software* SWAT-CUP, por meio do algoritmo SUFI2, que entre suas funções estão a execução da análise de sensibilidade. Esse processo é realizado conjuntamente com a calibração, por isso é necessário incluir nesta etapa as vazões estimadas pelo SWAT, as vazões monitoradas pela estação fluviométrica, pois a sensibilidade é estimada de acordo com as variações na função objetivo que avalia a eficácia da calibração do modelo.

Os parâmetros escolhidos para esta análise referem-se aos que podem ser ajustáveis e que estejam relacionados apenas à produção de água em uma bacia hidrográfica. O banco de dados do SWAT apresenta uma tabela com esses parâmetros de interesse indicando seus respectivos intervalos de variação de valores, plano de atuação (bacia, sub-bacia ou HRU), forma de variação dos valores (substituição, adição de um valor absoluto ou multiplicação de porcentagem do valor original), e o grupo de análise de sensibilidade do parâmetro (produção de água, produção de sedimentos ou qualidade da água). Na Tabela 11 são relacionados os parâmetros disponíveis para produção de água, sua descrição, os limites inferior (LI) e superior (LS) para ajustes e o método de variação dos valores.

Tabela 11 - Parâmetros da análise de sensibilidade relacionados à produção de água (continua).

Parâmetro	Descrição	Unidade	LI	LS	Método de variação
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	Dia	0	1	Substituição
BIOMIX	Eficiência da mistura biológica do solo	adim ¹	0	1	Substituição
BLAI	Índice máximo de área foliar	m ² /m ²	0	1	Substituição
CANMX	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação	Mm	0	10	Substituição
CH_K2	Condutividade hidráulica do canal	mm/h	0	150	Substituição
CH_N2	Coeficiente de Manning no canal principal	s/m ³	0	1	Substituição
CN2	Número da curva para condição de umidade II	adim ¹	-25%	25%	Multiplicação
EPCO	Fator de compensação da remoção de água pelas raízes	adim ¹	0	1	Substituição
ESCO	Fator de compensação da evaporação no solo	adim ¹	0	1	Substituição
GW_DELAY	Tempo de recarga do aquífero raso	Dia	-10	10	Adição
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água da zona de saturação	adim ¹	-0,036	0,036	Adição
GWQMN	Profundidade do aquífero raso para escoamento de base	Mm	-1000	1000	Adição
REVAPMN	Profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação	Mm	-100	100	Adição

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Parâmetros da análise de sensibilidade relacionados à produção de água (conclusão).

Parâmetro	Descrição	Unidade	LI	LS	Método de variação
SLSUBBSN	Comprimento médio da rampa de declividade	M	-25%	25%	Multiplicação
SOL_ALB	Fração de albedo do solo na capacidade de campo	adim ¹	-25%	25%	Multiplicação
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	mm/mm	-25%	25%	Multiplicação
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	-25%	25%	Multiplicação
SOL_Z	Profundidade da superfície até a base do horizonte do solo	Mm	-25%	25%	Multiplicação
SURLAG	Tempo de retardo do escoamento superficial	Dia	0	10	Substituição
TLAPS	Taxa de variação da temperatura com relação à altitude	°C/Km	0	50	Substituição

adim¹ = adimensional

Fonte: Autoria própria.

Além dos parâmetros listados pela Tabela 11, com relação à produção de água, também estão incluídos no banco de dados do SWAT os parâmetros temperatura da neve (SFTMP), fator de derretimento de neve em 21 de dezembro (SMFMN), fator de derretimento de neve em 21 de junho (SMFMX), temperatura base de derretimento de neve (SMTMP), fator de retardo da temperatura do bloco de neve (TIMP) e declividade (SLOPE). Os cinco primeiros parâmetros não foram incluídos no processo de análise de sensibilidade e calibração pelo fato da região de estudo ser de clima tropical onde não há ocorrência de neve, já o último parâmetro não foi considerado por não estar incluído na lista do SWAT-CUP.

Foram realizados quatro testes de análise de sensibilidade com intuito de verificar a influência da escolha do número de interações (variações nos valores de cada parâmetro dentro do intervalo estipulado pela Tabela 11) da simulação e do tamanho da série histórica de vazões, listados a seguir:

- 1º teste (SHL-FJ-300) – uso de uma série histórica longa (SHL) (1987 a 2015) a partir de dados de vazões da estação fluviométrica de Fazenda Jucuruaba (FJ) com 300 interações;

- 2º teste (SHL-CG-300) - uso de uma série histórica longa (1987 a 2015) a partir de dados de vazões da estação fluviométrica de Córrego do Galo (CG) com 300 interações;
- 3º teste (SHL-CG-100) - mesmas características do segundo teste, porém com 100 interações;
- 4º teste (SHC-CG-300) – uso de uma série histórica curta (2013 a 2015) a partir de dados de vazões da estação fluviométrica de Córrego do Galo com 300 interações.

Os resultados das análises de sensibilidade foram avaliados pelos valores *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor, mais sensível é o parâmetro, e o *p-value* que determina a significância da sensibilidade, e um valor próximo à zero indica maior significância, fornecidos pelo SWAT-CUP.

Por fim, os parâmetros mais sensíveis para a região de estudo foram comparados com os parâmetros do SWAT com relação à produção de água indicados pela literatura brasileira.

4.5. CALIBRAÇÃO

Os testes de calibração foram desenvolvidos com os dados de vazões das estações fluviométricas de Fazenda Jucuruaba e Córrego do Galo por meio do algoritmo SUFI2 presente no *software* SWAT-CUP.

Os testes foram baseados em quatro variáveis consideradas influentes no processo de calibração:

1. Tamanho da série histórica dos dados observados;
2. Escolha da estação fluviométrica que fornecerá os dados monitorados;
3. Utilização dos parâmetros mais sensíveis ou todos os parâmetros disponíveis para calibração de vazões;
4. Calibração de todas as sub-bacias ao mesmo tempo ou por partes, considerando para cada estação fluviométrica apenas as sub-bacias a montante da mesma.

Para a variável relacionada ao tamanho da série histórica foi atribuída duas situações: uma série longa de vazões correspondente ao período de janeiro de 1987 a dezembro de 2015, sendo os anos de 1984 a 1986 destinados ao aquecimento do modelo; e uma série curta de vazões de um período de 3 anos, de 2013 a 2015, sendo os anos de 2011 e 2012 reservados para o aquecimento da modelagem. A série histórica longa corresponde a todos os dados disponíveis neste estudo, por sua vez, optou-se por o período mais atual para a série curta, pelo fato dos dados climáticos não apresentarem falhas em nenhum de seus componentes.

Em todos os testes foram utilizadas conjuntamente as duas estações fluviométricas, tendo em vista que o SWAT-CUP permite esse procedimento. Porém, os resultados são apresentados separados para cada estação.

Foram executadas 300 interações em cada simulação nos testes de calibração com séries históricas longas, e 700 interações com séries históricas curtas. Além disso, todos os testes utilizaram os resultados das interações anteriores para cada nova interação.

O primeiro teste consistiu em utilizar a série histórica longa de vazões variando os parâmetros mais sensíveis indicados pela literatura, para ambas estações fluviométricas e para todas as sub-bacias. Os quatro próximos testes podem ser explicados pelo fluxograma da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de quatro testes de calibração usando série histórica longa.



Fonte: Autoria própria.

O teste apresentado no fluxograma da Figura 10 que apresentou melhor resultado foi usado para o teste de uma série histórica curta correspondente às estações fluviométricas. Dessa forma, foram realizados um total de seis testes de calibração:

- 1º teste (SHL-parâmetros literatura-total) – uso de uma série histórica longa (1987 a 2015) com os parâmetros mais sensíveis indicados pela literatura científica;
- 2º teste (SHL-parâmetros sensíveis-total) – uso de uma série histórica longa (1987 a 2015) com os parâmetros mais sensíveis obtidos neste estudo calibrando toda a bacia hidrográfica;
- 3º teste (SHL-parâmetros sensíveis-por partes) – uso de uma série histórica longa (1987 a 2015) com os parâmetros mais sensíveis obtidos neste estudo calibrando apenas as sub-bacias a montante de cada estação fluviométrica;
- 4º teste (SHL-todos parâmetros-total) - uso de uma série histórica longa (1987 a 2015) com todos os parâmetros calibrando toda a bacia hidrográfica;
- 5º teste (SHL-todos parâmetros-por partes) - uso de uma série histórica longa (1987 a 2015) com os todos os parâmetros calibrando apenas as sub-bacias a montante de cada estação fluviométrica;
- 6º teste - melhor resultado dos cinco testes anteriores usando uma série histórica curta (2013 a 2015).

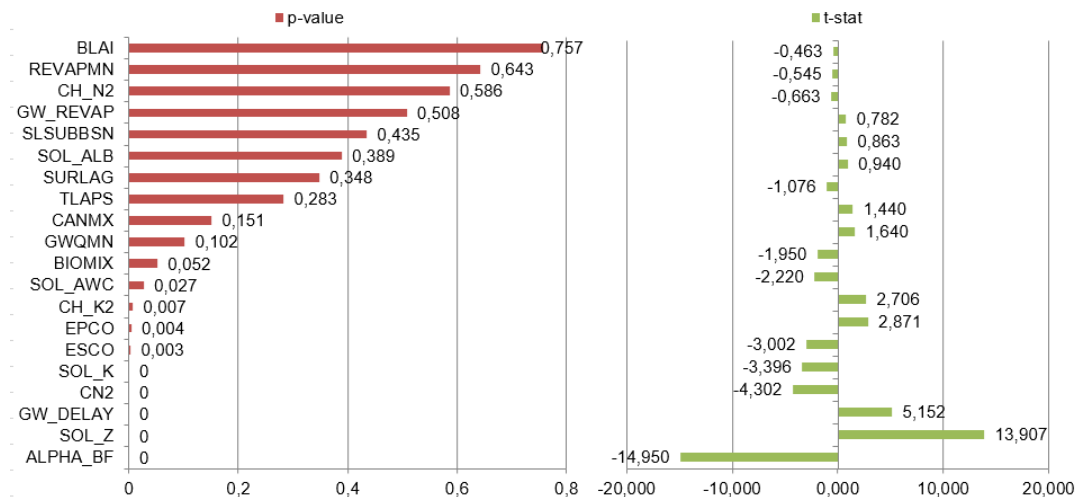
Para avaliação dos resultados obtidos após o processo de calibração, foram escolhidas três funções objetivos amplamente empregadas em estudos envolvendo modelagem hidrológica por meio do SWAT: Coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE), Percentagem bias (PBIAS) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RSR).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS

O primeiro teste (SHL-FJ-300) de análise de sensibilidade, com a maior série histórica de vazões disponível de 1987 a 2015 da estação fluviométrica de Fazenda Jucuruaba, com 300 interações, gerou a hierarquia de sensibilidade dos parâmetros apresentada na Figura 11, de acordo com os respectivos valores de *p-value* e *t-stat*.

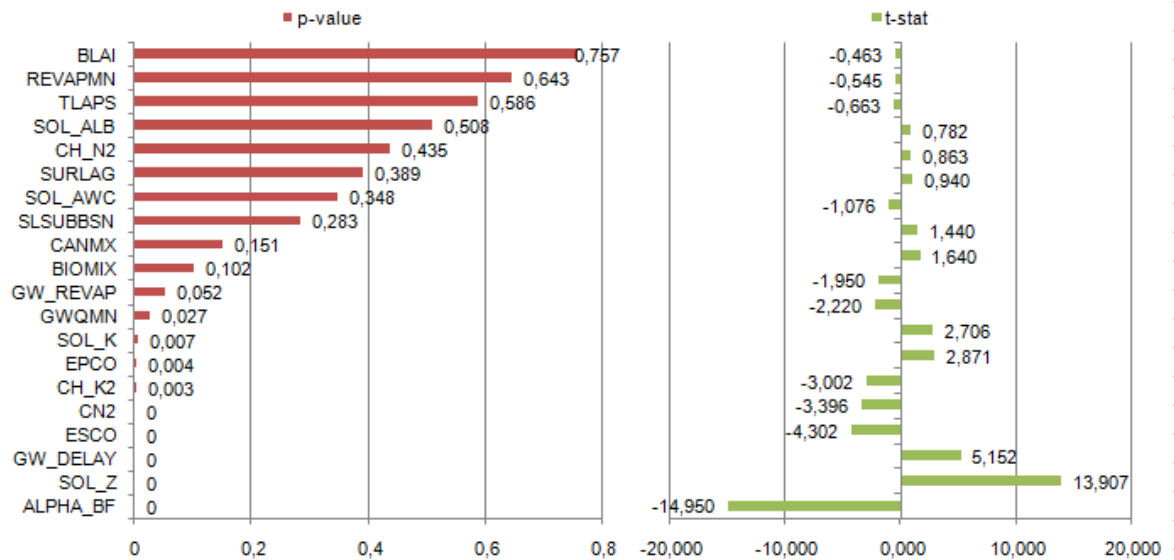
Figura 11 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o primeiro teste.



Fonte: Autoria própria.

O segundo teste (SHL-CG-300), também utilizando a maior série histórica de vazões disponível de 1987 a 2015 da estação fluviométrica de Córrego do Galo, com 300 interações, gerou a hierarquia de sensibilidade dos parâmetros apresentada na Figura 12, de acordo com os respectivos valores de *p-value* e *t-stat*.

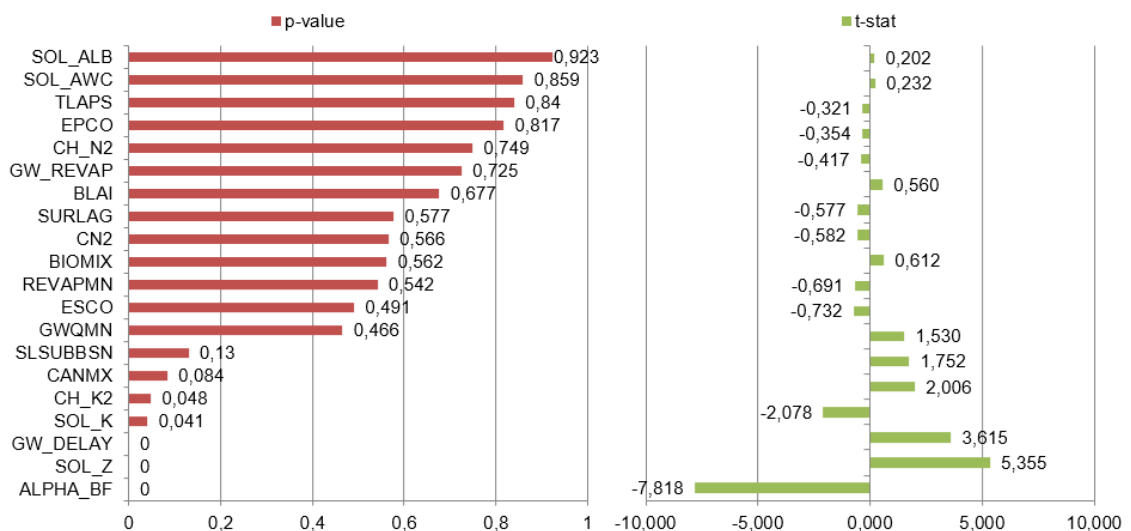
Figura 12 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o segundo teste.



Fonte: Autoria própria.

O terceiro teste (SHL-CG-100) baseado nas mesmas características da segunda, porém com um número menor de interações, igual 100, gerou os resultados dispostos na Figura 13.

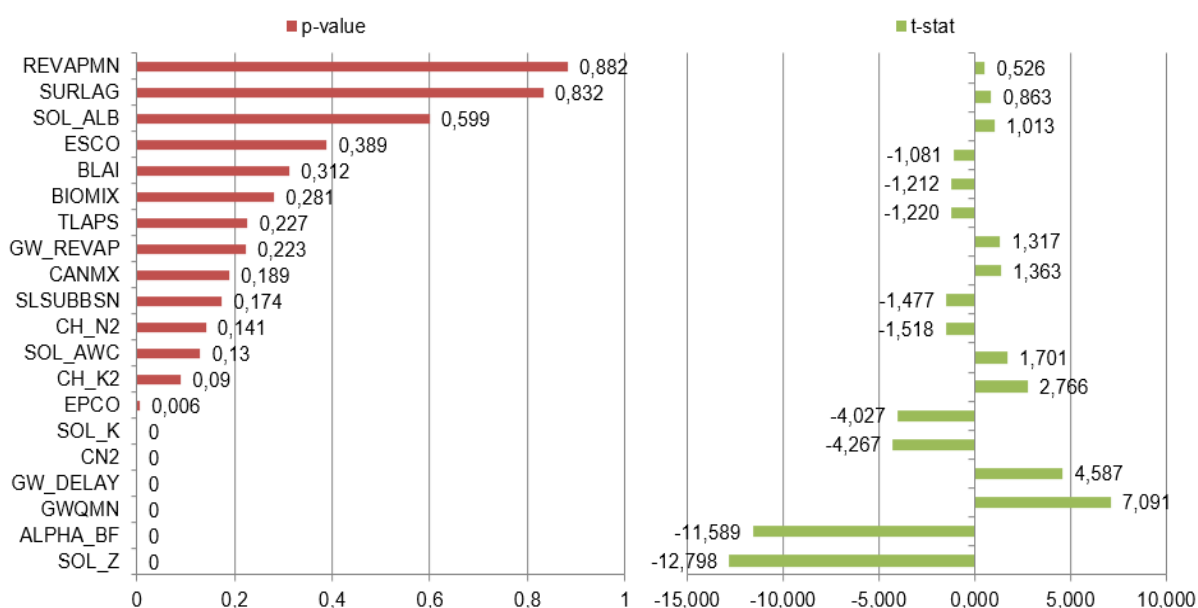
Figura 13 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o terceiro teste.



Fonte: Autoria própria.

O quarto teste (SHC-CG-300) que utilizou uma série histórica de 3 anos (2013 a 2015) e 300 interações apresentou a hierarquia de parâmetros sensíveis da Figura 14.

Figura 14 - Sensibilidade dos parâmetros de vazão para o quarto teste.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 12 é apresentada a classificação dos parâmetros segundo Van Griensven et al. (2006), que sugere categorias segundo suas respectivas sensibilidades, levando em consideração os 26 parâmetros relacionados à produção de água.

Tabela 12 - Classificação da sensibilidade dos parâmetros.

Categoria	Posição do Parâmetro
Muito importante	1
Importante	2 - 6
Ligeiramente importante	7 - 19
Sem importância	20 - 26

Fonte: Adaptado de Van Griensven et al. (2006).

Para cada teste, os parâmetros considerados como muito importantes e importantes, segundo Van Griensven et al. (2006), correspondem aos seis primeiros parâmetros com os menores valores de *p-value* e maiores valores em módulo e *t-stat*, em ordem decrescente de sensibilidade:

- 1º teste - ALPHA_BF, SOL_Z, GW_DELAY, CN2, SOL_K, e ESCO;

- 2º teste - ALPHA_BF, SOL_Z, GW_DELAY, ESCO, CN2 e CH_K2;
- 3º teste - ALPHA_BF, SOL_Z, GW_DELAY, SOL_K, CH_K2 e CANMX;
- 4º teste - SOL_Z, ALPHA_BF, GWQMN, GW_DELAY, CN2 e SOL_K.

Verifica-se que há uma mudança nos parâmetros mais sensíveis de acordo com as diferentes formas de manipulações dos dados de entrada. Portanto, a sensibilidade dos parâmetros além de possuir uma dependência direta com os dados de entrada relativos ao uso do solo, pedologia, características físicas, dados climáticos da região de estudo, também depende da maneira como está sendo realizada a análise de sensibilidade.

Destaca-se a importância de enfatizar todas as considerações utilizadas na análise de sensibilidade de parâmetros, a escolha dos mesmos deve estar condicionada a circunstâncias mais relevantes para aquela região de estudo e justificada cada escolha, como tamanho da série histórica, estação de monitoramento, número de interações da simulação, intervalo mínimo, máximo e método de variação de cada parâmetro durante a análise de sensibilidade.

Neste estudo de caso, optou-se pelos cinco parâmetros em comum obtidos nos primeiro e segundo testes, visto que os testes de calibração utilizaram dados monitorados de ambas estações fluviométricas. O número de interações considerado como adequado corresponde a estas alternativas, por ser uma recomendação do desenvolvedor do SWAT-CUP. E, por fim, optou-se pela maior série histórica disponível que abrange uma série de eventos de cheias e secas.

Dessa forma, verificou-se como os parâmetros mais sensíveis para a região de estudo da bacia hidrográfica do rio Jucu, considerando estações de monitoramento de vazões da Fazenda Jucuruaba e do Córrego do galo com séries históricas compreendidas de 1987 a 2015, e análise de sensibilidade realizada variando os parâmetros 300 vezes: ALPHA_BF, SOL_Z, GW_DELAY, ESCO e CN2.

Tendo em vista que a sensibilidade dos parâmetros varia de acordo com a região de estudo, foi realizado um levantamento na literatura brasileira com relação à estimativa de vazões através do modelo SWAT e obteve-se a relação de parâmetros com maiores sensibilidades em bacias hidrográficas localizadas em diferentes estados brasileiros, apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros sensíveis para diferentes locais no Brasil.

Autor	Ano	Parâmetros em ordem decrescente de sensibilidade	Estado	Região
Fukunaga	2012	CN2, GWQMN, ESCO, CANMX, SOL_K, SOL_AWC	Espírito Santo	Sudeste
Andrade, Mello e Beskow	2013	CN2, ALPHA_BF, ESCO, SOL_Z, SOL_K, SOL_AWC	Minas Gerais	Sudeste
Durães	2010	ESCO, ALPHA_BF, SOL_Z, GWQMN, GW_DELAY, SOL_AWC	Minas Gerais	Sudeste
Lelis et al.	2012	CN2, SOL_AWC, SOL_K, ESCO, ALPHA_BF, SOL_Z	Minas Gerais	Sudeste
Melo Neto	2013	ALPHA_BF, GWQMN, CN2, ESCO, SOL_AWC, BLAI	Minas Gerais	Sudeste
Pinto	2011	ALPHA_BF, CH_K2, CN2, SURLAG, SOL_K, CH_N2	Minas Gerais	Sudeste
Barbarotto Junior	2014	CN2, SLSUBBSN, ALPHA_BF, SOL_Z, ESCO, SOL_K	São Paulo	Sudeste
Kuwakima	2012	SOL_K, CN2, SOL_AWC, GW_DELAY	São Paulo	Sudeste
Pereira	2013	SOL_K, ALPHA_BF, ESCO, CN2, CH_N2, CH_K2	Rio de Janeiro	Sudeste
Bonumá et al.	2011	CN2, ESCO, ALPHA_BF, CH_K2, BLAI, GWQMN	Rio Grande do Sul	Sul
Lino et al.	2009	ALPHA_BF, CN2, ESCO, SURLAG, GW_DELAY	Santa Catarina	Sul
Malutta	2012	ALPHA_BF, ESCO, CN2, CANMX, BLAI, GWQMN	Santa Catarina	Sul
Sarmento	2010	CN2, SURLAG, GWQMN, SOL_Z, GW_REVAP	Distrito Federal	Centro-oeste
Salles	2012	CN2, CH_K2, SURLAG, ALPHA_BF, ESCO, GWQMN	Distrito Federal	Centro-oeste
Castro	2013	SURLAG, ALPHA_BF, GWQMN, SOL_K, CH_K2, CN2	Distrito Federal	Centro-oeste

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 3 apresenta os parâmetros considerados mais sensíveis em cada estudo, ou seja, nas categorias muito importante e importante, segundo Van Griensven et al. (2006). Como pode ser observado pelo Quadro 3, os parâmetros mais sensíveis para cada região de estudo não variam muito, independente das bacias hidrográficas.

Nos estudos realizados em diferentes partes do Brasil, os parâmetros apresentando maior grau de sensibilidade foram: CN2, ALPHA_BF, ESCO, GWQMN, SOL_K e SOL_Z. Nos estudos realizados na região sudeste do país, tem destaque os

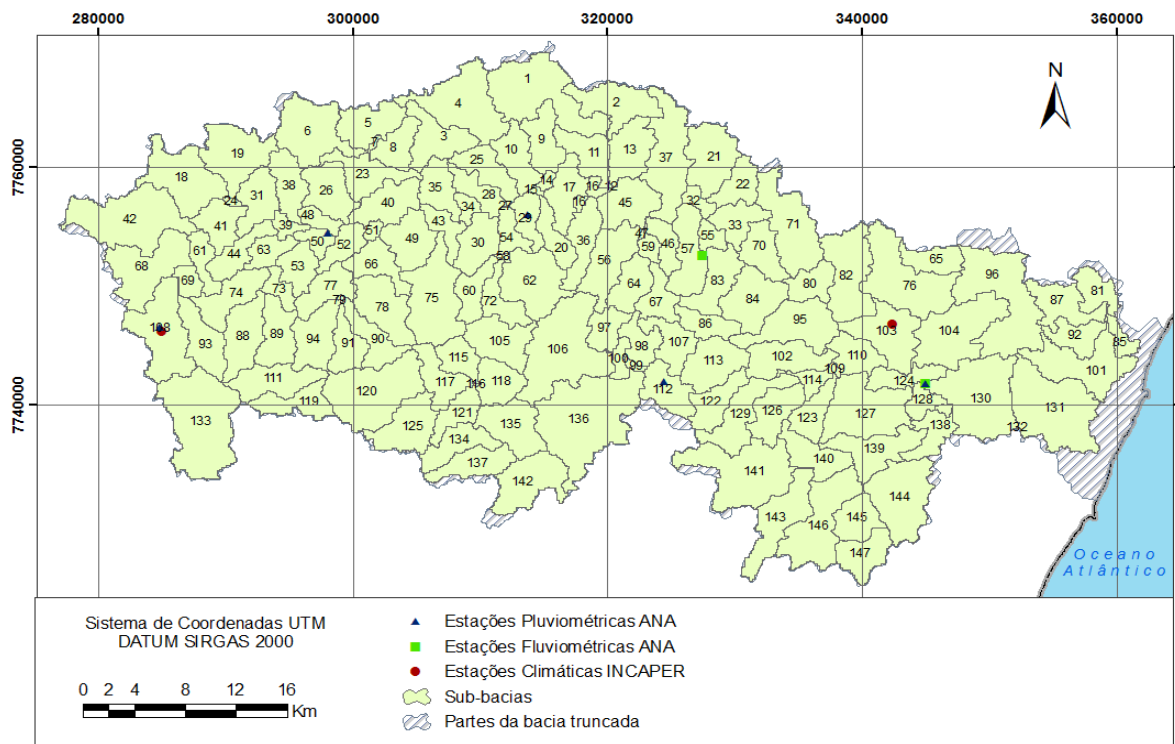
parâmetros CN2, ALPHA_BF, ESCO, SOL_K, SOL_Z e SOL_AWC. Comparando-se os parâmetros mais sensíveis observados na região do estudo, verificou-se boa correspondência com os parâmetros mais sensíveis observados para o Brasil, com exceção dos parâmetros GWQMN e SOL_K. Com relação aos parâmetros mais sensíveis da região sudeste do país, a exceção ocorreu para os parâmetros SOL_K e SOL_AWC.

5.2. ANÁLISE DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO NA ESTIMATIVA DE VAZÕES

5.2.1. Estimativa de vazões no SWAT

A bacia hidrográfica da região de estudo foi dividida em 147 sub-bacias que geraram um total de 2341 unidades de respostas hidrológicas. As estações fluviométricas Fazenda Jucuruaba está localizada na sub-bacia 128, enquanto a estação Córrego do Galo está na sub-bacia 57, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Sub-bacias da região de estudo e localização das estações de vazão e climáticas.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 13 são apresentados os valores obtidos para cada parâmetro pedológico no SWAT.

Tabela 13 - Parâmetros de cada classe de solo da bacia hidrográfica do rio Jucu (continua).

Parâmetros	LVd2	LVd3	LVd12	Cd1	PV2	AMd2	Ad1	AR
NLAYERS	7	7	5	5	5	3	6	2
HYDGRP	A	A	A	C	B	B	C	D
SOL_Z1	120.00	200.00	200.00	100.00	100.00	100.00	80.00	150.00
SOL_BD1	1.32	1.14	1.90	1.08	1.70	1.80	1.70	1.70
SOL_AWC1	0.11	0.13	0.11	0.16	0.11	0.02	0.16	0.12
SOL_K1	5.00	18.00	18.00	12.50	12.50	500.00	20.00	20.00
CLAY1	44.65	39.00	37.62	33.00	17.08	1.00	22.00	17.86
SILT1	8.55	8.00	6.93	13.00	6.71	2.00	20.00	20.68
SAND1	41.80	53.00	54.45	54.00	37.21	97.00	58.00	55.46
ROCK1	5.00	0.00	1.00	0.00	39.00	0.00	0.00	6.00
SOL_ALB1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
SOL_Z2	300.00	400.00	400.00	270.00	280.00	270.00	300.00	700.00
SOL_BD2	1.32	1.14	1.46	1.10	1.50	1.80	1.70	1.70
SOL_AWC2	0.13	0.12	0.16	0.17	0.12	0.02	0.14	0.12
SOL_K2	4.40	10.00	4.40	5.00	5.00	500.00	12.50	20.00
CLAY2	52.25	43.70	55.44	44.00	25.62	1.00	26.00	21.36
SILT2	6.65	4.75	4.95	11.00	6.10	2.00	17.00	23.14
SAND2	36.10	46.55	38.61	45.00	29.28	97.00	57.00	44.50
ROCK2	5.00	5.00	1.00	0.00	39.00	0.00	0.00	11.00
SOL_ALB2	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
SOL_Z3	700.00	900.00	1000.00	920.00	700.00	1600.00	450.00	-
SOL_BD3	1.09	0.98	1.48	1.16	1.20	1.80	1.70	-
SOL_AWC3	0.15	0.13	0.15	0.20	0.19	0.01	0.15	-
SOL_K3	3.80	5.00	4.40	3.80	2.50	500.00	12.50	-
CLAY3	57.04	52.47	56.43	48.00	60.75	1.00	32.00	-
SILT3	5.52	3.96	6.93	10.56	2.43	5.00	17.00	-
SAND3	29.44	42.57	35.64	37.44	17.82	96.00	51.00	-
ROCK3	8.00	1.00	1.00	4.00	19.00	0.00	0.00	-
SOL_ALB3	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	-
SOL_Z4	1900.00	2000.00	1600.00	1270.00	1200.00	-	700.00	-
SOL_BD4	1.09	1.03	1.46	1.36	1.20	-	1.60	-
SOL_AWC4	0.16	0.12	0.15	0.20	0.20	-	0.17	-

Fonte: Autoria própria.

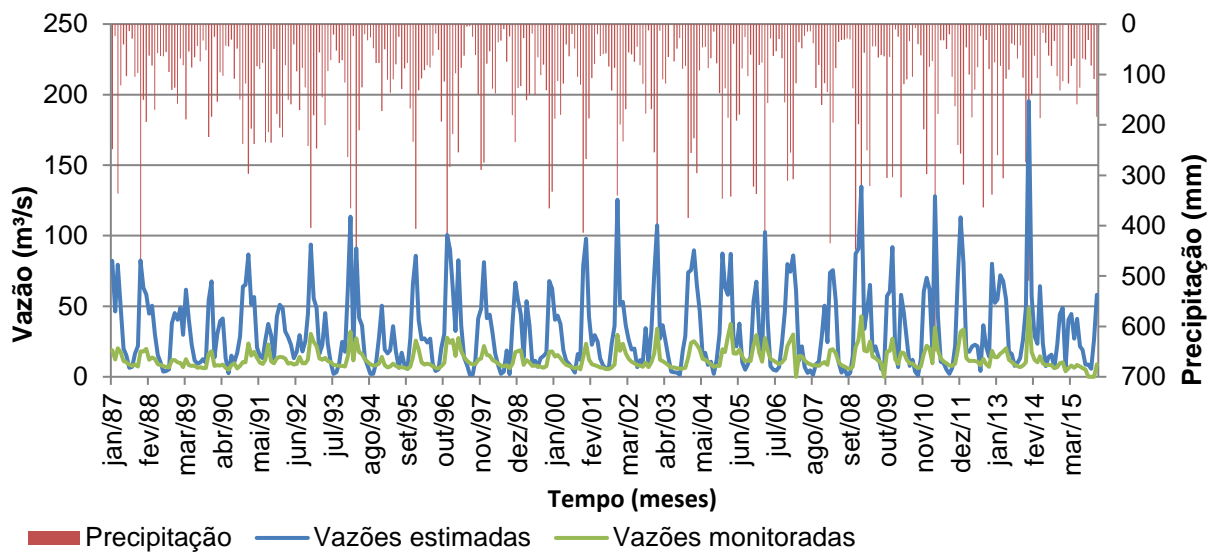
Tabela 13 - Parâmetros de cada classe de solo da bacia hidrográfica do rio Jucu (conclusão).

Parâmetros	LVd2	LVd3	LVd12	Cd1	PV2	AMd2	Ad1	AR
SOL_K4	3.80	5.00	4.40	3.80	2.50	-	5.00	-
CLAY4	57.66	51.41	55.44	44.10	63.08	-	37.00	-
SILT4	5.58	4.85	4.95	14.70	3.32	-	23.00	-
SAND4	29.76	40.74	38.61	39.20	16.60	-	40.00	-
ROCK4	7.00	3.00	1.00	2.00	17.00	-	0.00	-
SOL_ALB4	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	-	0.15	-
SOL_Z5	3200.00	3200.00	1960.00	1620.00	1700.00	-	1150.00	-
SOL_BD5	1.09	1.15	1.40	1.42	1.20	-	1.70	-
SOL_AWC5	0.17	0.14	0.15	0.19	0.19	-	0.21	-
SOL_K5	3.80	4.40	4.40	20.00	2.50	-	12.50	-
CLAY5	57.96	55.29	55.44	23.76	51.80	-	33.00	-
SILT5	5.52	3.88	4.95	34.65	5.18	-	35.00	-
SAND5	28.52	37.83	38.61	40.59	17.02	-	32.00	-
ROCK5	8.00	3.00	1.00	1.00	26.00	-	0.00	-
SOL_ALB5	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	-	0.15	-
SOL_Z6	4500.00	3900.00	-	-	-	-	1300.00	-
SOL_BD6	1.09	1.15	-	-	-	-	1.80	-
SOL_AWC6	0.15	0.14	-	-	-	-	0.01	-
SOL_K6	3.80	5.00	-	-	-	-	500.00	-
CLAY6	54.60	43.70	-	-	-	-	0.96	-
SILT6	4.55	7.60	-	-	-	-	4.80	-
SAND6	31.85	43.70	-	-	-	-	90.24	-
ROCK6	9.00	5.00	-	-	-	-	4.00	-
SOL_ALB6	0.15	0.15	-	-	-	-	0.15	-
SOL_Z7	5700.00	4500.00	-	-	-	-	-	-
SOL_BD7	1.09	1.60	-	-	-	-	-	-
SOL_AWC7	0.16	0.09	-	-	-	-	-	-
SOL_K7	3.80	60.00	-	-	-	-	-	-
CLAY7	53.94	18.62	-	-	-	-	-	-
SILT7	4.65	16.66	-	-	-	-	-	-
SAND7	34.41	62.72	-	-	-	-	-	-
ROCK7	7.00	2.00	-	-	-	-	-	-
SOL_ALB7	0.15	0.15	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

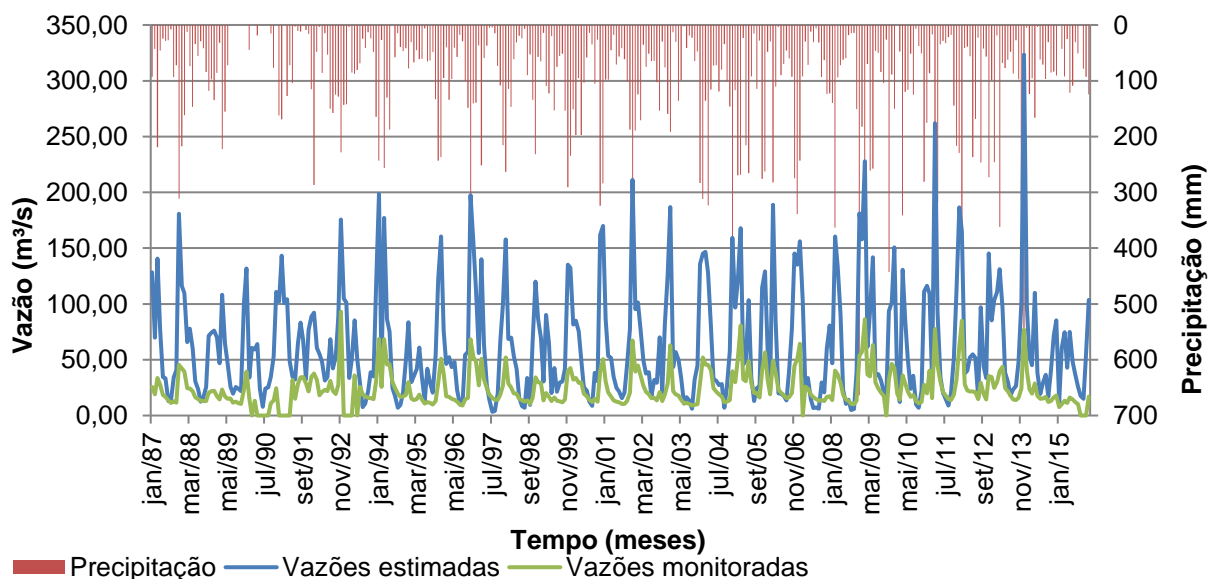
As vazões estimadas para cada sub-bacia utilizam dados da estação climática mais próxima. Na Figura 16 é apresentado o gráfico de precipitações registradas na estação pluviométrica de Marechal Floriano e as vazões estimadas pelo SWAT e monitoradas pela estação fluviométrica Córrego do Galo na sub-bacia 57, por sua vez, o gráfico da Figura 17 representa as precipitações registradas na estação pluviométrica Fazenda Jucuruaba e as vazões estimadas pelo SWAT e monitoradas pela estação fluviométrica Fazenda Jucuruaba da sub-bacia 128.

Figura 16 - Vazões (estimadas e monitoradas) e precipitações da sub-bacia 57.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Vazões (estimadas e monitoradas) e precipitações da sub-bacia 128.



Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 16 e 17 é possível notar a correspondência entre os dados de precipitações e as vazões estimadas, corroborando a competência do modelo em acompanhar aumentos e diminuições de vazões. Porém, as vazões simuladas estão superestimadas quando comparadas com as vazões monitoradas (aproximadamente três vezes maiores para ambas as sub-bacias). As comparações das vazões estimadas e monitoradas, para as sub-bacias 57 e 128, geraram valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe iguais a -19,78 e -11,88, respectivamente, considerados insatisfatórios segundo Moriasi et al. (2007).

Além da influência dos dados de pluviosidade, a estimativa de vazões por meio do SWAT depende também das características físicas, pedológicas e de manejo do solo da bacia hidrográfica em estudo.

Mais de 75% da bacia hidrográfica do rio Jucu é formada pela classe de solo latossolo vermelho amarelo distrófico A moderado textura argilosa, ocupando a porção média e alta da bacia, como pode ser observado na Figura 4. A partir dos valores obtidos pela Tabela 13, são explanadas as observações a seguir.

Essa classe de solo é caracterizada por solos profundos, chegando a 45 metros de profundidade e até 7 horizontes, o que contribui para um menor escoamento superficial, pois solos pouco profundos saturam-se rapidamente, contribuindo para o escoamento superficial. Essa característica corrobora a classificação de Tucci (2014) com relação ao grupo hidrológico A classificado por SCS (1986) em solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração, são profundos e bem drenados.

Verifica-se que a densidade aparente do solo reduz com aumento da profundidade, indicando que essa classe de solo é mais compacta na superfície e há um aumento na porosidade ao longo da profundidade, quanto mais denso o solo, menor a porosidade. Segundo Prado (2013), a porosidade influi na dinâmica da água no solo representando o volume de espaços vazios entre as partículas. Após a drenagem, a água fica armazenada nos microporos e o ar permanece nos macroporos. Quanto maior a porcentagem de macroporos no solo, maior é sua permeabilidade, contribuindo para infiltração.

O elevado índice de vazões também está relacionado a este tipo de solo que está localizando em uma região montanhosa, como pode ser observado na Figura 3, favorecendo o processo de geração do deflúvio.

A condutividade hidráulica do solo saturado apresentou valores maiores na superfície do solo quando comparados às camadas mais profundas, onde são encontrados maiores teores de argila e menor grau de porosidade. Segundo Gonçalves e Libardi (2013), a condutividade hidráulica na condição saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo e, ao elevar o grau de agregação (grau de intemperismo, porcentagem de argila e de matéria orgânica) de um solo, o valor aumenta. Geralmente os maiores valores de condutividade hidráulica estão associados aos maiores valores de porosidade, entretanto o estudo realizado por Bouma (1982) verificou que pequenos poros contínuos podem conduzir mais água em comparação com poros maiores que apresentam descontinuidade no perfil do solo, em solos com pouco intemperismo.

A análise da estimativa de vazões não é suficiente quando um fator é considerado. Além da classe pedológica, é importante compatibilizar com manejo de solo exercido naquela região. Sabe-se que o uso do solo predominante na região de estudo é a mata nativa, cobrindo uma área maior que 40% da bacia hidrográfica do rio Jucu e mais de 20% de área de pastagem. Uma das principais influências da mata nativa no escoamento superficial é o processo de interceptação onde parte da precipitação é temporariamente retida pela massa vegetal e em seguida evaporada para a atmosfera. Desse modo, os picos de vazões são amortecidos.

Um dos parâmetros mais influentes com relação ao uso e ocupação do solo na estimativa de vazões é o CN, parâmetro utilizado pelo método SCS que busca retratar a capacidade de infiltração da área em função do tipo de solo, do uso e ocupação e das condições de umidade de uma área. Muitos estudos na literatura têm apontando que o método SCS tende a superestimar as vazões. Há dificuldades em atribuir valores de CN para a área de estudo, apesar de existirem tabelas disponíveis na literatura, estas não apresentam todas as classes de uso e tipos de solo. Para a aplicação do método, foram realizadas adaptações, procedimento que pode aumentar os erros da estimativa de vazão.

Fukunaga (2012) obteve vazões estimadas pelo SWAT, para uma série histórica de 3,5 anos da microbacia do córrego Jaqueira, sub-bacia da bacia hidrográfica do rio

Itapemirim (a sudoeste da bacia do rio Jucu), muito superiores às vazões observadas. A comparação entre as vazões estimadas e observadas por meio do coeficiente de Nash-Sutcliffe foi igual -137, o que indica uma correlação muito distante do valor satisfatório de 0,5.

Guimarães (2016) estimou vazões em três sub-bacias pertencentes à bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória para uma série histórica de 3 anos, localizada ao norte da bacia do rio Jucu, por meio do SWAT. As vazões estimadas em ambas sub-bacias foram superestimadas quando comparadas com as vazões observadas. Os coeficientes de Nash-Sutcliffe obtido na comparação entre as vazões estimadas, antes da calibração, e observadas foram insatisfatórios, com valores para cada sub-bacia de -35,43, -9,91 e -5,59.

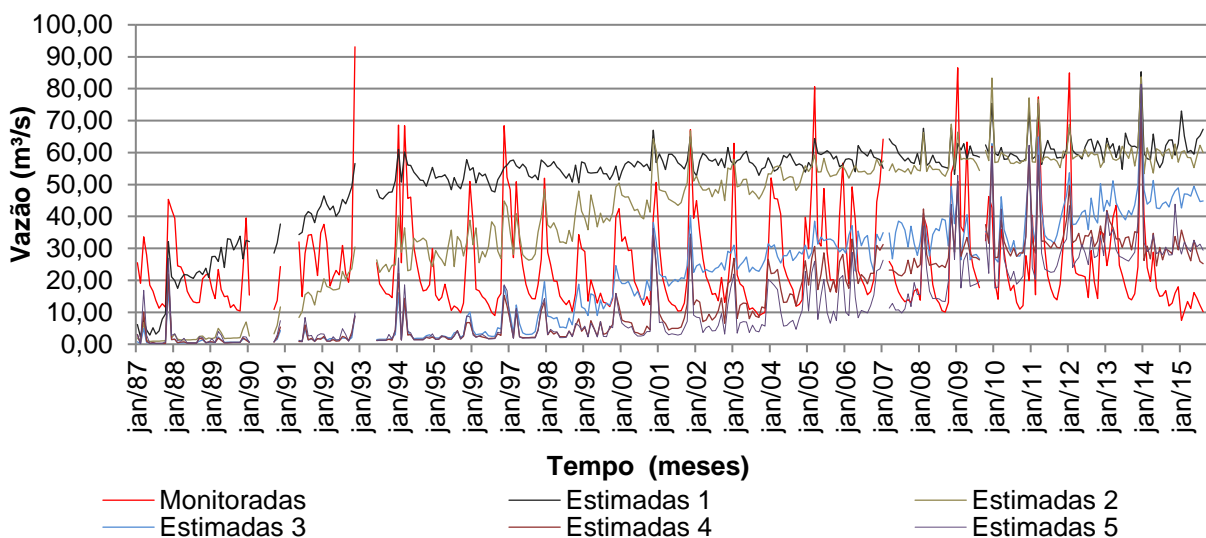
5.2.2. Processos de calibração no SWAT-CUP

Nos testes de calibração valores dos intervalos dos parâmetros foram variados a cada nova interação, de acordo com as sugestões do SWAT-CUP e respeitando os intervalos permitidos para os parâmetros.

O primeiro teste (SHL-parâmetros literatura-total) de calibração das vazões estimadas pelo SWAT consistiu em variar os valores dos parâmetros considerados mais sensíveis pela literatura científica segundo estudos realizados na região sudeste do país, visto que o local deste estudo está nesta região: CN2, ALPHA_BF, ESCO, GWQMN, SOL_K e SOL_Z, apresentados no item 5.1.

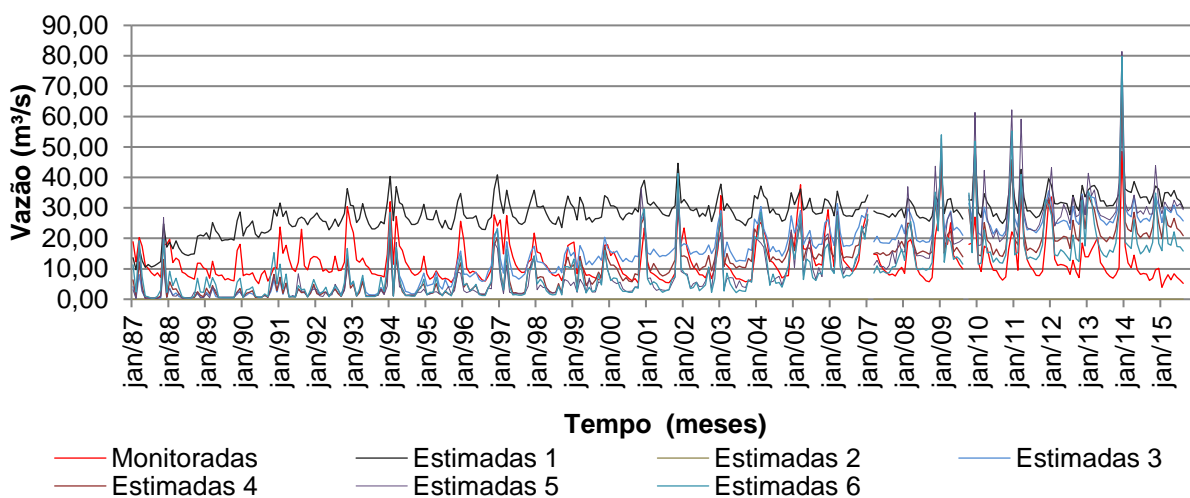
As comparações das séries de vazões simuladas em cada interação com as séries históricas mensais, de 1987 a 2015, para as estações de Fazenda Jucuruaba e Córrego do Galo, respectivamente, são apresentadas nas Figuras 18 e 19. Por sua vez, na Tabela 14 são apresentados os valores das funções objetivo para cada estimativa considerando ambas estações fluviométricas.

Figura 18 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o primeiro teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o primeiro teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Valores das funções objetivo do primeiro teste de calibração.

Estação Fluviométrica	Função Objetivo	Estimadas - Interação					
		1	2	3	4	5	6
Fazenda Jucuruaba	COE	-3,71	-2,25	-0,75	-0,59	-0,66	-
	PBIAS	-108,80	-64,90	14,90	38,60	48,40	-
	RSR	2,17	1,8	1,32	1,26	1,29	-
Córrego do Galo	COE	-5,21	-3,24	-1,28	-0,64	-0,40	-0,44
	PBIAS	-124,60	-87,90	-20,50	4,70	16,30	17,50
	RSR	2,49	2,11	1,51	1,28	1,18	1,20

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado pelas Figuras 18 e 19, a alteração nos valores dos parâmetros mais sensíveis indicados pela literatura provocaram mudanças significativas nas vazões estimadas, o que corrobora a sensibilidade desses parâmetros para este estudo de caso.

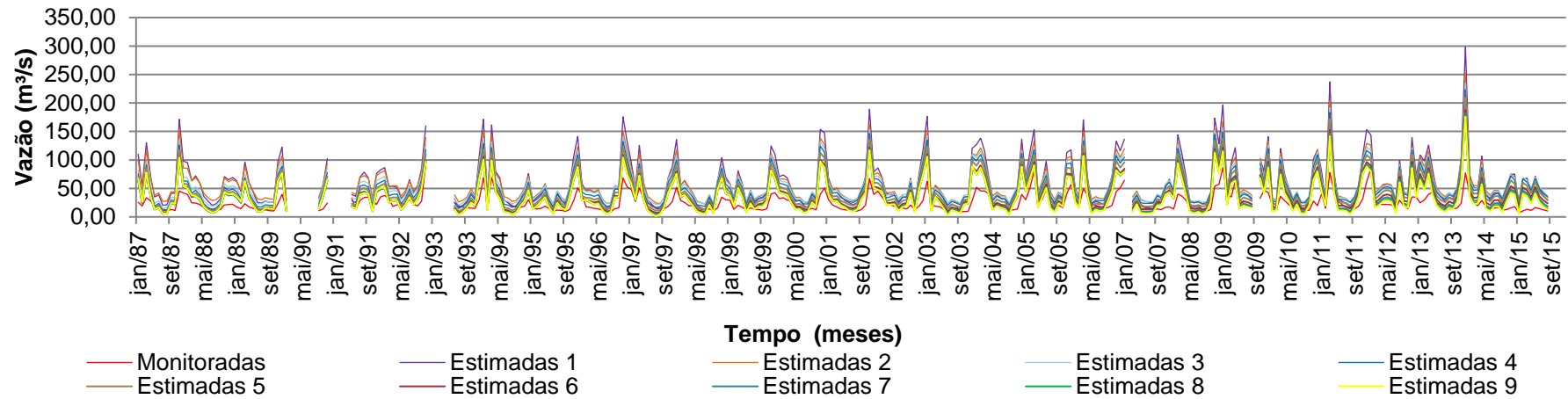
Esse teste não gerou uma calibração adequada, tendo em vista que o melhor o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) foi de -0,59 para estação de Fazenda Jucuruaba e -0,40 para Córrego do Galo, sendo que o ideal seria valor maior que 0,50, assim como os valores de RSR maiores que 0,70. Desta forma, a calibração pode ser classificada como insatisfatória, segundo valores propostos por Moriasi et al (2007), indicados na Tabela 5. Apesar dos valores de PBIAS serem considerados como bons para a terceira estimativa relativa à Fazenda Jucuruaba, e para as quinta e sexta estimativas do Córrego do Galo, para a mesma estação PBIAS foi classificado como muito bom na quarta estimativa e como satisfatório na terceira estimativa.

Diante dos resultados dos valores das funções objetivo corrobora a necessidade de escolher mais de uma função para analisar os resultados, assim como a configuração dos gráficos das vazões estimadas e monitoradas. As vazões estimadas onde PBIAS obteve "bons" resultados apresentaram valores distorcidos com relação às vazões monitoradas, além dos demais coeficientes considerarem a calibração como insatisfatória.

Apesar de os parâmetros indicados pela literatura serem coerentes com a realidade do estudo de caso deste trabalho, é importante que seja realizada a análise de sensibilidade, logo, o segundo teste (SHL-parâmetros sensíveis-total) de calibração utilizou os parâmetros mais sensíveis da área de estudo indicados pelo item 5.1 (ALPHA_BF, SOL_Z, GW_DELAY, ESCO e CN2), para mesma série histórica mensal, com ambas as estações fluviométricas, para todas as sub-bacias. Nas Figuras 20 e 21 são apresentadas as vazões estimadas para cada interação e monitoradas de cada estação fluviométrica, e na Tabela 15 os valores das funções objetivos.

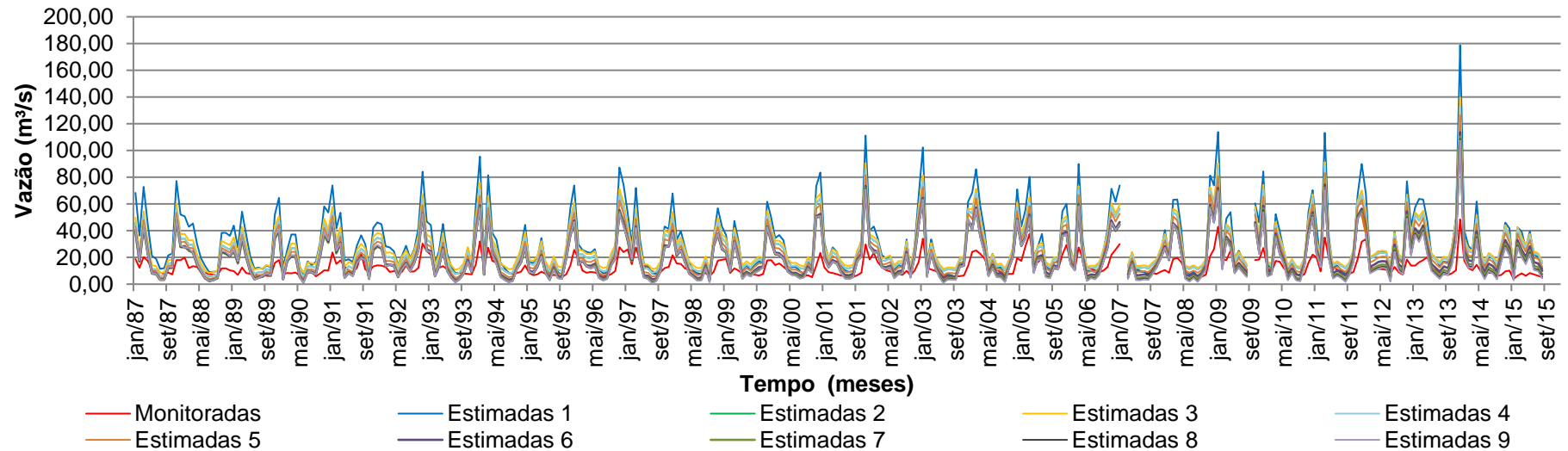
O terceiro teste (SHL-parâmetros sensíveis-por partes) considerou as mesmas características do segundo teste, porém a calibração foi realizada apenas para as sub-bacias à montante de cada estação fluviométrica. Nas Figuras 22 e 23 são apresentadas as vazões estimadas para cada interação e monitoradas, e na Tabela 16, os respectivos valores das funções objetivo.

Figura 20 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o segundo teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o segundo teste de calibração.



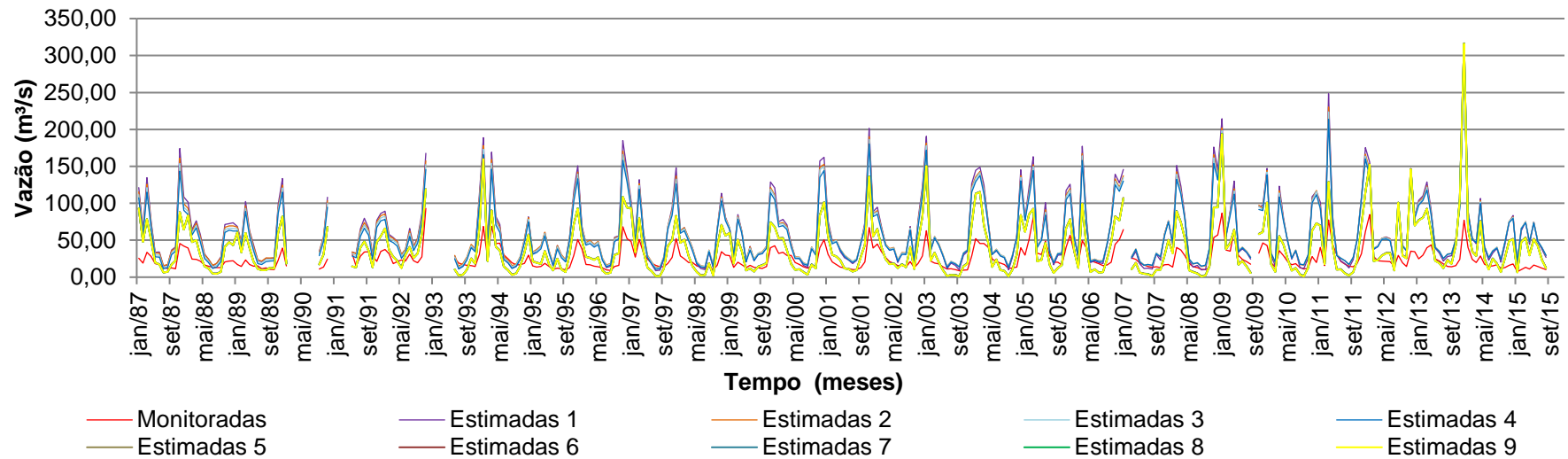
Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 - Valores das funções objetivo do segundo teste de calibração.

Estação Fluviométrica	Função Objetivo	Estimadas - Interação								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fazenda Jucuruaba	COE	-8,82	-6,82	-5,38	-4,08	-2,62	-1,26	-0,92	-0,79	-0,79
	PBIAS	-142,30	-141,00	-125,00	-105,80	-81,40	-55,50	-44,30	-38,90	-37,70
	RSR	3,13	2,80	2,53	2,25	1,90	1,50	1,38	1,34	1,34
Córrego do Galo	COE	-14,03	-10,68	-8,50	-6,69	-4,83	-2,83	-2,39	-2,27	-2,32
	PBIAS	-147,90	-146,80	-129,50	-110,00	-86,80	-60,90	-50,70	-46,20	-45,60
	RSR	3,88	3,42	3,08	2,77	2,41	1,95	1,84	1,81	1,82

Fonte: Autoria própria.

Figura 22 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o terceiro teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o terceiro teste de calibração.

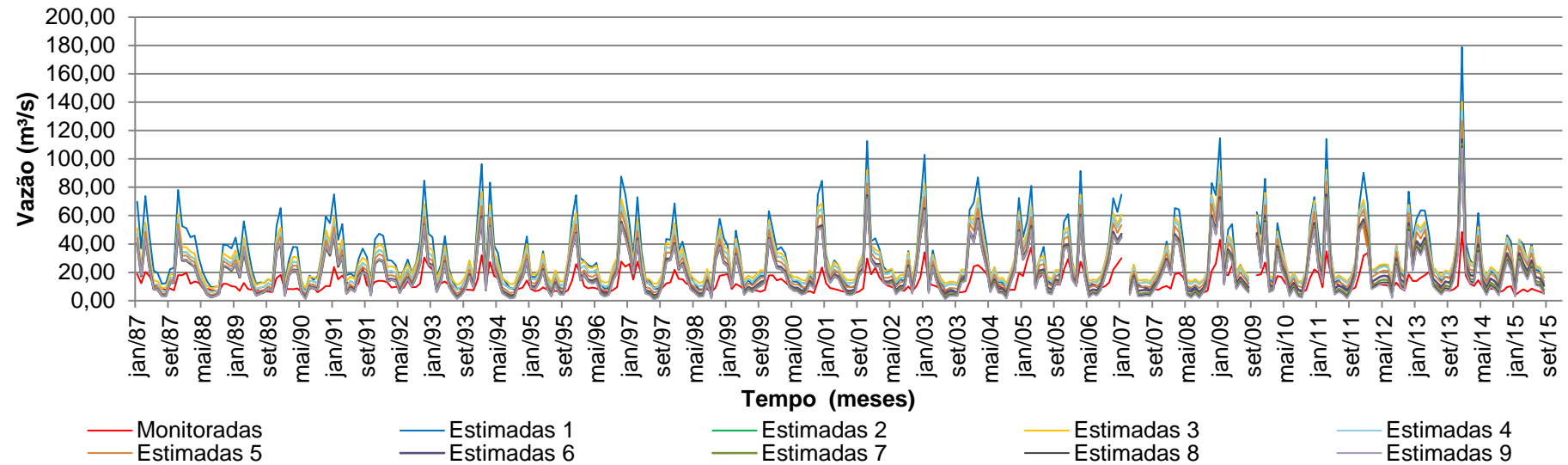


Tabela 16 - Valores das funções objetivo do terceiro teste de calibração.

Estação Fluviométrica	Função Objetivo	Estimadas - Interação								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fazenda Jucuruaba	COE	-10,40	-9,06	-8,40	-7,32	-2,65	-2,63	-2,61	-2,60	-2,60
	PBIAS	-148,10	-144,80	-139,30	-129,30	-53,60	-52,90	-52,40	-52,10	-51,90
	RSR	3,38	3,17	3,07	2,88	1,91	1,90	1,90	1,90	1,90
Córrego do Galo	COE	-14,80	-11,28	-9,25	-7,31	-5,26	-3,07	-2,55	-2,38	-2,39
	PBIAS	-154,20	-152,10	-136,60	-116,60	-92,40	-65,50	-53,70	-48,10	-46,70
	RSR	3,97	3,50	3,20	2,88	2,50	2,02	1,88	1,84	1,84

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado pelas Figuras 20 e 21, referentes ao segundo teste de calibração, a alteração nos valores dos parâmetros obtidos através da análise de sensibilidade da referida região de estudo, explanada pelo item 5.1, provocaram mudanças significativas nas vazões estimadas, confirmando a sensibilidade desses parâmetros utilizados.

Para este teste foram necessárias mais interações para alcançar o melhor ajuste de calibração, além disso, apresentou gráficos mais coerentes com as vazões monitorados, porém superestimados, quando comparado com o primeiro teste.

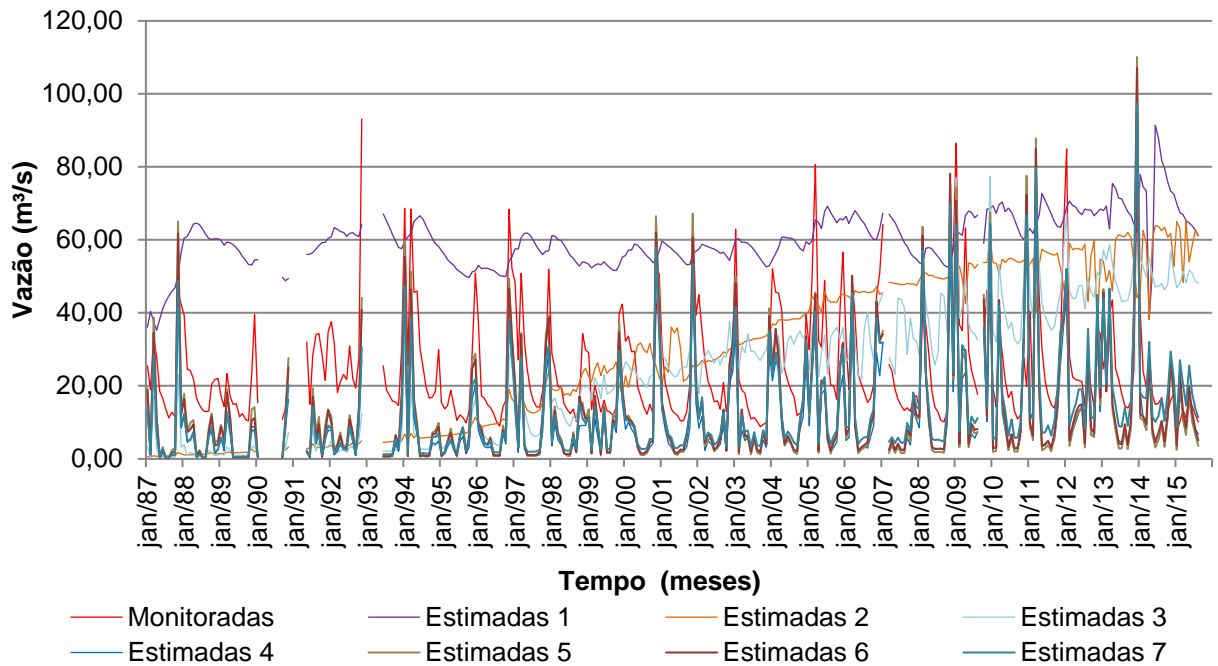
Entretanto esse teste não gerou uma calibração adequada, sendo o melhor o valor COE igual a -0,79 e RSR igual a 1,34 para estação de Fazenda Jucuruaba, e COE e RSR iguais a -2,27 e 1,81 para Córrego do Galo, classificando a calibração como insatisfatória. Os valores de PBIAS também não foram satisfatórios, tendo em vista que os melhores foram -37,7 e -45,6 para as estações de Fazenda Jucuruaba Córrego do Galo, respectivamente.

Mesmo utilizando os parâmetros mais sensíveis obtidos da própria área de estudo, o resultado não foi adequado, por isso optou pelo terceiro teste o qual utilizou uma calibração por partes. Por meio das Figuras 22 e 23, verifica-se que este teste apresentou vazões com comportamento semelhante ao segundo teste, inclusive com relação aos valores dos coeficientes estatísticos COE, RSR e PBIAS.

Assim como no segundo teste, não foi possível obter uma calibração adequada no terceiro teste, os melhores valores de COE foram iguais a -2,60 e -2,38, RSR iguais a 1,90 e 1,84 e PBIAS iguais a -51,90 e -46,7 para as estações de Fazenda Jucuruaba e Córrego do Galo, respectivamente.

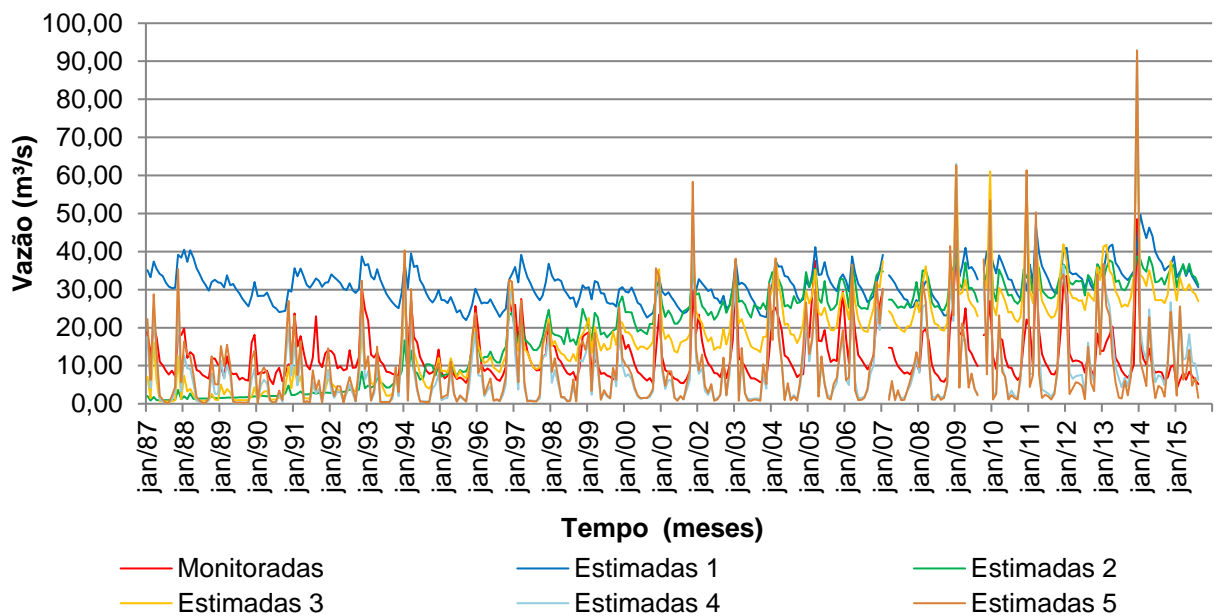
O quarto teste (SHL-todos parâmetros-total) de calibração optou por utilizar todos os parâmetros de calibração de vazão disponíveis, pois apesar de muitos desses serem pouco sensíveis, exercem influência no valor final da vazão, além de um exercer influência sobre o outro, dessa forma, apesar de demandar maior esforço computacional, o processo de calibração torna-se mais completo. Nas Figuras 24 e 25 são apresentadas as vazões estimadas para cada interação e monitoradas, e na Tabela 17 são apresentados os valores das respectivas funções objetivos.

Figura 24 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o quarto teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o quarto teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 - Valores das funções objetivo do quarto teste de calibração.

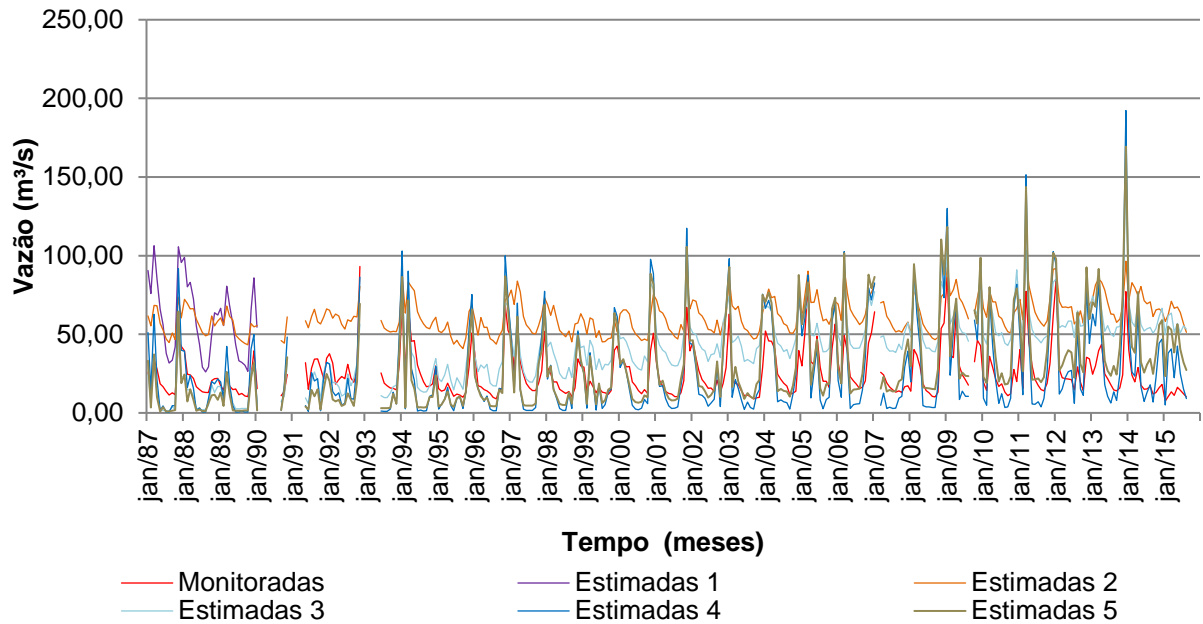
Estação Fluviométrica	Função Objetivo	Estimadas - Interação						
		1	2	3	4	5	6	7
Fazenda Jucuruaba	COE	-5,47	-1,86	-0,76	-0,43	-0,20	-0,18	-0,19
	PBIAS	-139,70	-17,00	-0,80	56,80	47,80	47,80	47,20
	RSR	2,54	1,69	1,33	1,19	1,10	1,09	1,09
Córrego do Galo	COE	-7,33	-3,35	-1,86	-0,50	-0,60	-	-
	PBIAS	-148,10	-57,80	-42,20	29,00	22,50	-	-
	RSR	2,89	2,09	1,69	1,22	1,27	-	-

Fonte: Autoria própria.

Considerando os valores de COE e RSR, a calibração é classificada como insatisfatória, tendo em vista que os melhores valores encontrados, dessas funções objetivo, foram -0,19 e 1,09 para a estação de Fazenda Jucuruaba, respectivamente. O valor PBIAS considerada a calibração muito boa na estimativa 3 e boa na estimativa 2 para a estação de Fazenda Jucuruaba. Para a estação de Córrego do Galo, PBIAS classifica a calibração como satisfatória na quinta estimativa, que diverge dos resultados de COE e RSR iguais a -0,50 e 1,22 na melhor estimativa, respectivamente. Comparando os valores das funções objetivos obtidos neste teste com os testes anteriores que utilizaram apenas os parâmetros mais sensíveis nas calibrações, principalmente com o segundo teste, que utilizou todas as sub-bacias da área de estudo como este teste, verifica-se uma melhora, alcançando valores mais próximos aos indicados por Moriasi et al. (2007).

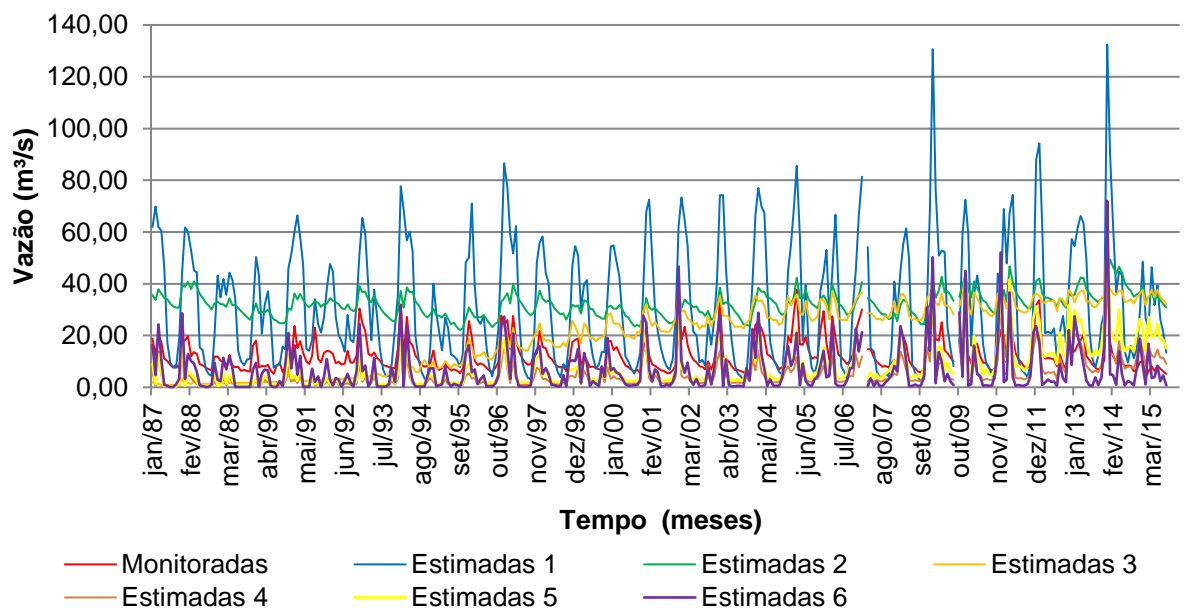
No quinto teste (SHL-todos parâmetros-por partes) optou-se em realizar a calibração por partes, com as mesmas características do quarto teste, de forma que a variação dos valores dos parâmetros seria realizada apenas para as sub-bacias a montante das estações de monitoramento de vazões, os resultados podem ser observados pelas Figuras 26 e 27 e pela Tabela 18.

Figura 26 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o quinto teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o quinto teste de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 - Valores das funções objetivo do quinto teste de calibração.

Estação Fluviométrica	Função Objetivo	Estimadas - Interação					
		1	2	3	4	5	6
Fazenda Jucuruaba	COE	-6,140	-5,30	-1,52	-0,62	-0,73	-
	PBIAS	-149,12	-148,22	-66,20	-6,80	-20,00	-
	RSR	-2,25	-2,24	1,59	1,27	1,32	-
Córrego do Galo	COE	-14,46	-7,90	-3,65	-0,95	-0,53	-0,57
	PBIAS	-151,40	-153,70	-60,50	60,00	35,30	46,20
	RSR	3,93	2,98	2,16	1,40	1,24	1,25

Fonte: Autoria própria.

Assim como os demais testes anteriores, o quinto teste também não resultou em uma calibração adequada, tendo em vista que o melhor o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) foi de -0,53 para estação de Fazenda Jucuruaba e -0,62 para Córrego do Galo, o mesmo ocorreu com RSR que apresentou valores maiores que 0,70 para ambas as estações, classificando a calibração como insatisfatória. Porém, os valores de PBIAS foram considerados como muito bom na quarta estimativa e satisfatório na quinta estimativa da Fazenda Jucuruaba, com valores iguais a -6,80 e -20,00, respectivamente. Mais uma vez confirmando a necessidade de escolher mais de uma função para analisar os resultados.

Na Tabela 19 são apresentados os valores de COE para cada teste de calibração, tendo em vista que esta função objetivo foi a de melhor relevância para avaliação da eficiência do processo de calibração.

Tabela 19 - Tabela resumo dos valores de COE para cada teste de calibração.

Estações Fluviométricas	Testes (melhor COE)				
	1º	2º	3º	4º	5º
Fazenda Jucuruaba	-0,59	-0,79	-2,60	-0,18	-0,62
Córrego do Galo	-0,40	-2,27	-2,38	-0,50	-0,53

Fonte: Autoria própria.

O sexto teste consistiu em reduzir a série histórica para 3 anos e utilizar as características do teste que obteve o melhor resultado, ou seja, o quarto teste, que

obteve valores de COE iguais a -0,18 e -0,50 para as estações de Fazenda Jucuruaba e Córrego do Galo, respectivamente. Dessa forma utilizou uma série histórica de 2013 a 2015 e variou todos os parâmetros 700 vezes. Nas Figuras 28 e 29 são apresentados os resultados desse teste, assim como na Tabela 20.

Figura 28 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Fazenda Jucuruaba para o sexto teste de calibração.

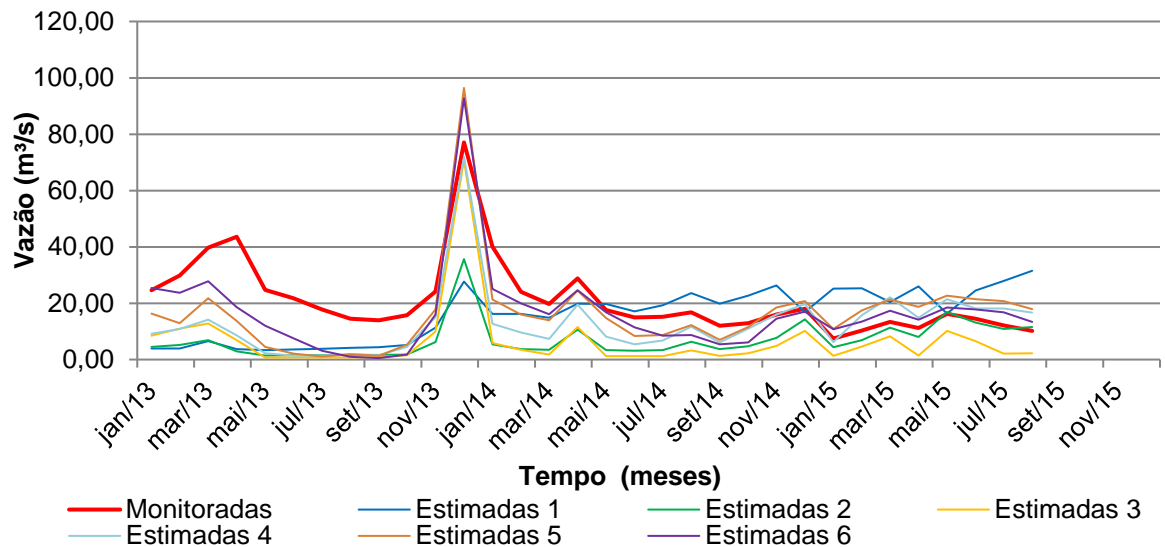


Figura 29 - Vazões estimadas para cada interação e monitoradas da estação de Córrego do Galo para o sexto teste de calibração.

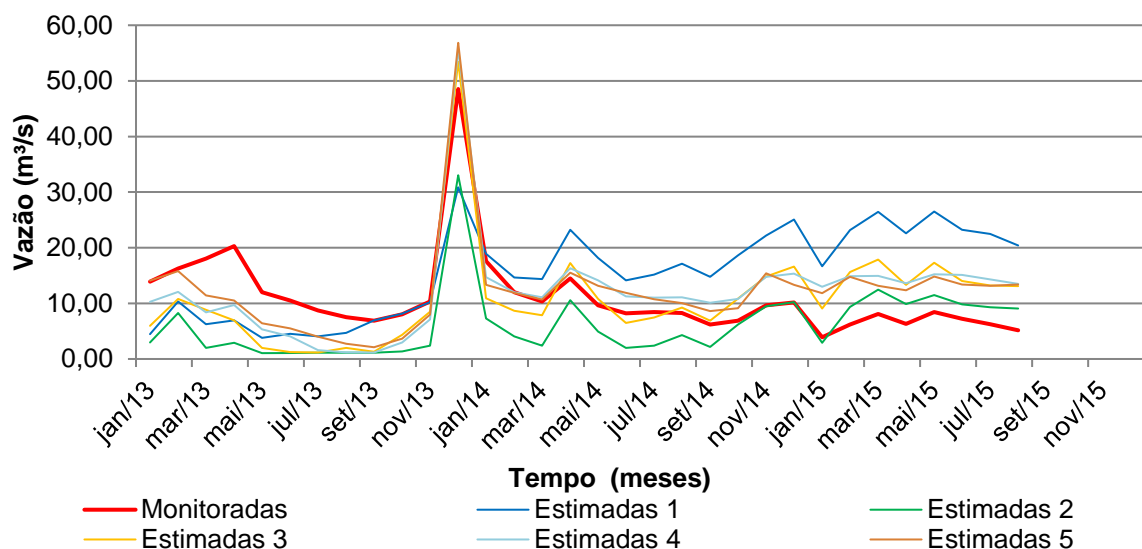


Tabela 20 - Valores das funções objetivo do sexto teste de calibração.

Estação Fluviométrica	Função Objetivo	Estimadas - Interação					
		1	2	3	4	5	6
Fazenda Jucuruaba	COE	-0,84	-0,86	-0,53	-0,10	0,18	0,50
	PBIAS	22,70	64,70	67,40	36,40	20,50	20,70
	RSR	1,36	1,36	1,24	1,05	0,91	0,72
Córrego do Galo	COE	-1,26	-0,02	0,19	0,35	0,53	-
	PBIAS	-45,50	40,30	-2,20	-11,50	-12,30	-
	RSR	1,50	1,01	0,90	0,81	0,69	-

Fonte: Autoria própria.

Por meio da Tabela 20, verifica-se para estação de Fazenda Jucuruaba que a calibração se mostrou adequada na última estimativa, obtendo a seguinte classificação de acordo com Morasi et al. (2007):

- COE igual a 0,50, compreendido entre 0,50 a 0,65, calibração satisfatória;
- PBIAS igual a 20,70, compreendido entre ± 20 e ± 25 , calibração satisfatória;
- RSR igual a 0,72, valores maiores que 0,70, calibração insatisfatória.

No caso da estação de Córrego do Galo, a calibração também se mostrou adequada na última estimativa, sendo classificação de acordo com Morasi et al. (2007):

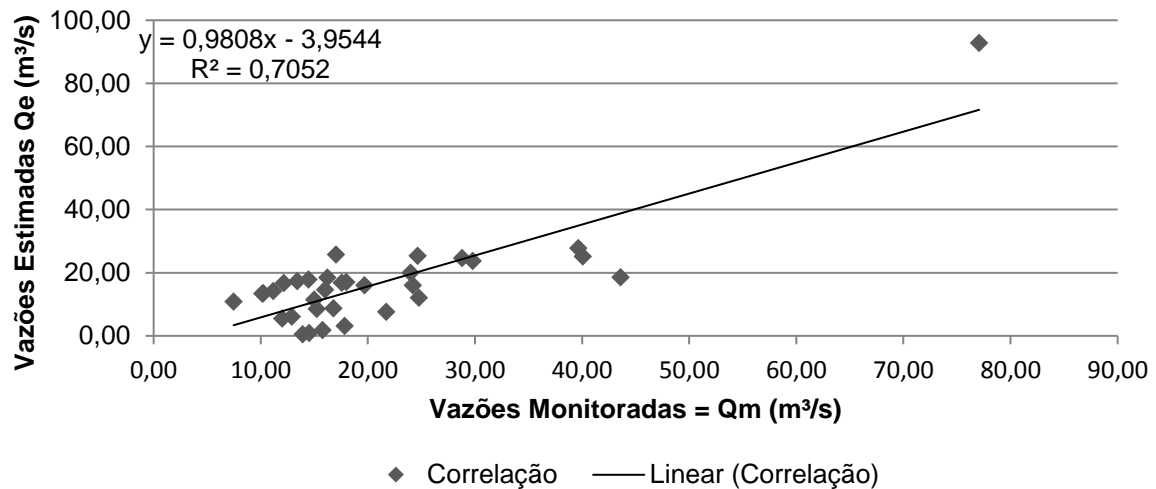
- COE igual a 0,53, compreendido entre 0,50 a 0,65, calibração satisfatória;
- PBIAS igual a -12,30, compreendido entre ± 10 e ± 20 , calibração boa;
- RSR igual a 0,69, valores entre 0,60 e 0,70, calibração satisfatória.

Assim como pode ser observado nos gráficos das Figuras 16 a 27, porém com maior destaque nas Figuras 28 e 29 devido à menor série de dados de vazões, valores elevados no mês de dezembro de 2013 devido à um evento intenso de chuvas neste período, que pode ser observado nos gráficos de precipitações das Figuras 16 e 17.

Em caso de modelos que superestimam muito os valores de vazão, verifica-se que séries muito longas são mais complicadas de calibrar devido à grande quantidade de dados que devem ser ajustados para um valor aproximado do real, pois a calibração é um ajuste fino. Séries históricas com menor quantidade de dados são mais fáceis de ajustar, mesmo quando o modelo apresenta resultados superestimados, pois há menor quantidade de dados para ajustar.

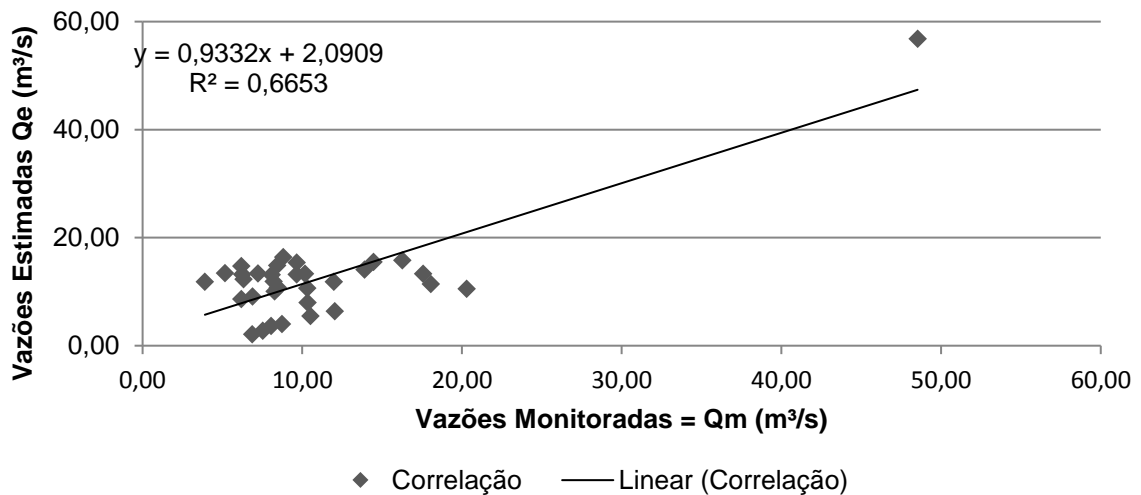
Nas Figuras 30 e 31 são apresentados os gráficos de correlação entre as vazões estimadas e monitoradas para cada estação fluviométrica por meio da análise do comportamento da linha de tendência linear e o coeficiente de determinação (R^2).

Figura 30 - Correlação entre vazões estimadas e monitoradas pela estação de Fazenda Jucuruaba.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Correlação entre vazões estimadas e monitoradas pela estação de Córrego do Galo.



Fonte: Autoria própria.

Segundo os resultados apresentados nas Figuras 30 e 31, a calibração com dados de ambas estações fluviométricas atingiram valores razoáveis de coeficiente de determinação, sendo que para a estação de Fazenda Jucuruaba a correlação foi melhor.

5.3. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NA ESTIMATIVA DE VAZÕES

Na Tabela 21 são apresentados os valores de cada parâmetro os quais geraram uma calibração satisfatória das vazões estimadas com dados da estação de Córrego do Galo localizada na sub-bacia 57 e com os dados da estação de Fazenda Jucuruaba localizada na sub-bacia 128, com relação ao sexto teste de calibração.

Tabela 21 - Valores dos parâmetros da calibração satisfatória das vazões estimadas.

Parâmetro	Método de variação	Limite Inicial	Limite Final	Valor Inicial	Valor Calibrado		Unidade
					Sub ² 57	Sub ² 128	
ALPHA_BF	Substituição	0	1	0,048	0,0007	0,0004	dia
BIOMIX	Substituição	0	1	0,200	0,1675	0,0333	adim ³
BLAI	Substituição	0	1	Vários ¹	0,0306	0,0007	m ² /m ²
CANMX	Substituição	0	10	0	3,0	0,4	mm
CH_K2	Substituição	0	150	0	21,9	14,9	mm/h
CH_N2	Substituição	0	1	0,014	0,590	1,000	s/m ³
CN2	Multiplicação	-25%	25%	Vários ¹	-25,92%	-23,09%	adim ³
EPCO	Substituição	0	1	1,000	0,5470	0,7791	adim ³
ESCO	Substituição	0	1	0,950	0,4168	0,2529	adim ³
GW_DELAY	Adição	-10	10	31,00	39,17	38,35	dia
GW_REVAP	Adição	-0,036	0,036	0,020	0,0509	0,1284	adim ³
GWQMN	Adição	-1000	1000	1000	332	408	mm
REVAPMN	Adição	-100	100	750	647	695	mm
SLSUBBSN	Multiplicação	-25%	25%	Vários ¹	-45,86%	-29,12%	m
SOL_ALB	Multiplicação	-25%	25%	Vários ¹	45,23%	50,60%	adim ³
SOL_AWC	Multiplicação	-25%	25%	Vários ¹	38,87%	39,06%	mm/mm
SOL_K	Multiplicação	-25%	25%	Vários ¹	-37,12%	-51,74%	mm/h
SOL_Z	Multiplicação	-25%	25%	Vários ¹	73,21%	58,04%	mm
SURLAG	Substituição	0	10	4,000	4,1187	3,5652	dia
TLAPS	Substituição	0	50	0	5,73	4,24	°C/Km

Vários¹ = apresentam valores diferentes para cada sub-bacia, uso do solo ou pedologia.

Sub² = sub-bacia.

adim³ = adimensional.

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros utilizados na calibração podem ser divididos de acordo com sua área de atuação, o que facilita a explanação sobre a influência dos mesmos na quantificação das vazões, estes podem estar relacionados com a:

- hidrodinâmica subterrânea: ALPHA_BF, GW_DELAY, GW_REVAP, GWQMN e REVAPMN;
- uso e ocupação do solo: EPCO, BIOMIX, BLAI, CANMX e CN2;
- pedologia: ESCO, SOL_ALB, SOL_AWC, SOL_K e SOL_Z;
- características físicas de bacias hidrográficas: CH_K2, CH_N2, SLSUBBSN, SURLAG e TLAPS.

A constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF) é um índice que representa a resposta do fluxo de água subterrânea às mudanças na recarga do aquífero raso. De acordo com Ford e Williams (1989) **apud** Arnold et al. (1995), quanto menor o valor de ALPHA_BF, mais lenta é a drenagem, ou seja, há uma resposta lenta ao reabastecimento do aquífero, enquanto valores altos ocorrem em terrenos com drenagem rápida e pouco armazenamento. Houve reduções significativas em ambas sub-bacias no valor desse parâmetro, tendo em vista diminuir o escoamento superficial na bacia, ou seja, reduzir a drenagem do fluxo de base. O que também pode ser observado nos trabalhos de Durães (2010), Fukunaga (2012) e Pinto (2011), que obtiveram valores iguais a 0,0045 dia, 0,027 dia e 0,012 dia, respectivamente. Porém alguns estudos realizados por Guimarães (2016), Castro (2013), Kuwajima (2012) e Dantas et al. (2015) encontraram valores acima do atribuído pelo SWAT (0,048), como 0,24 dia, 0,10 dia, 1,138 dias e 0,513 dia, respectivamente.

O tempo de retardo da saída de água do perfil do solo até entrar no aquífero raso (GW_DELAY) depende do nível piezométrico e das propriedades hidráulicas das formações geológicas do solo (ARNOLD et al., 2012). A calibração do modelo aumentou o valor inicial, de forma a favorecer a percolação no solo e reduzir o escoamento superficial. Houve aumento do valor deste parâmetro nos estudos de Durães (2010) e Pinto (2011), nas ordens de 9 dias e 9,056 dias, respectivamente, entretanto Dantas et al. (2015) obteve uma redução de 15,87 dias.

O coeficiente "revap" de água subterrânea (GW_REVAP) controla o fluxo da água subterrânea do aquífero raso para a zona insaturada acima ou a retirada de água dos

aquíferos por plantas com raízes profundas (ARNOLD et al., 2012). Quanto maior o valor deste parâmetro, maior o fluxo de água subterrânea, o que pode ser observado neste estudo de caso, no qual os valores aumentaram significativamente para ambas sub-bacias. Acréscimos nos valores deste parâmetro também podem ser observados nos trabalhos de Brito (2015), Fukunaga (2012), Kuwajima (2012) e Dantas et al. (2015), na ordem de 0,19, 0,188, 0,25 e 0,116, respectivamente.

O limite de profundidade do aquífero raso para ocorrer o fluxo de retorno, ou seja, a água subterrânea atinge a superfície apenas se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou maior do que o GWQMN. As profundidades obtidas foram reduzidas em mais de 50% para as duas sub-bacias, assim como nos trabalhos de Durães (2010) e Pinto (2011), que reduziram a profundidade em -382 mm e -950 mm, respectivamente.

O limite de profundidade do aquífero raso para ocorrer "revap" ou fluxo de água do aquífero raso para o aquífero profundo corresponde ao REVAPMN. O movimento de água de um aquífero raso para a zona insaturada é permitida apenas se o volume de água no aquífero raso é maior ou igual ao Revapmn. Neste estudo, o limite dessa profundidade foi reduzido em 7,33% para a sub-bacia 57 e 13,73% para a sub-bacia 128, diferente de Guimarães (2016) que obteve um acréscimo de 455 mm.

O fator de compensação de água pelas plantas (EPCO) está relacionado à quantidade de água utilizada por elas que depende de suas demandas e da quantidade de água disponível no perfil do solo. Na medida em que o teor de umidade das camadas superficiais do perfil diminui, as plantas compensam nas camadas mais profundas. Quanto maior o valor de EPCO, camadas mais profundas serão compensadas (ARNOLD et al., 2012). O valor de EPCO também foi reduzido, sendo a maior redução para a sub-bacia 57, assim como Dantas et al. (2010) obteve uma redução na ordem de 37,90%.

A eficiência da mistura biológica (BIOMIX) dos constituintes do solo varia, segundo Arnold et al. (2012), com o sistema de gestão do solo. A mudança do preparo convencional de lavoura para o plantio direto aumenta a mistura biológica. A calibração reduziram os valores para 0,1675 e 0,0333, para as sub-bacias 57 e 128, respectivamente, menor que os valores calibrados por Guimarães (2016) e Dantas et al. (2010) iguais a 0,67 e 0,57, respectivamente.

O índice do potencial máximo de área foliar (BLAI) é usado para quantificar o desenvolvimento foliar durante a fase de crescimento da planta. O índice é calculado dividindo a área foliar pela área ocupada no terreno, sendo necessário montar campos experimentais para representar a densidade das plantas (ARNOLD, et al., 2012). A calibração resultou na troca dos valores de BLAI para $0,0306 \text{ m}^2/\text{m}^2$ para a sub-bacia 57, significativamente maior que o valor calibrado para sub-bacia 128 igual a $0,0007 \text{ m}^2/\text{m}^2$, aplicados aos usos do solo da região de estudo.

O armazenamento máximo do dossel (CANMX) pode afetar significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração, interceptando as gotas da chuva e armazenando parte da água. Esse parâmetro agrega a interceptação do dossel, o armazenamento na superfície e a infiltração antes de calcular o escoamento superficial pelo método SCS (ARNOLD, et al., 2012). A calibração gerou um valor de 3 mm de armazenamento no dossel das vegetações da área de estudo considerando a sub-bacia 57, valor próximo ao encontrado por Dantas (2015) igual a 5 mm, porém superior ao calibrado na sub-bacia 128 igual a 0,4 mm.

O valor do número da curva para a condição de umidade II do método SCS (CN2) é uma função de permeabilidade do solo, uso do solo e condições antecedentes de água no solo (ARNOLD, et al., 2012). Quanto maior o valor de CN2, maior o escoamento superficial, neste caso, o valor foi reduzido em mais de 20% para ambas sub-bacias. Os trabalhos de Guimarães (2016), Carvalho (2014), Fukunaga (2012), Pinto (2011), Kuwajima (2012) e Dantas et al. (2015) também apresentaram reduções de 38%, 48%, 9,4%, 24%, 60,8% e 4,82%, respectivamente.

O fator de compensação de evaporação do solo (ESCO) modifica a profundidade usada para determinar a demanda evaporativa do solo, levando em consideração o efeito da capilaridade. Quanto menor os valores de ESCO, maior a quantidade de água extraída por evaporação de níveis mais baixos do solo (ARNOLD et al., 2012). Os valores reduziram após calibração, o que favorece a extração de água por evaporação nas camadas mais profundas do solo. Brito (2015), Guimarães (2016), Durães (2010), Fukunaga (2012), Pinto (2011), Kuwajima (2012) e Dantas et al. (2015) obtiveram reduções para 0,68, 0,62, 0,64, 0,57, 0,69, 0,90 e 0,61 respectivamente.

O albedo do solo úmido (SOL_ALB) consiste na razão entre a quantidade de energia refletida por um corpo e a quantidade de radiação incidente, sendo importante no processo de evaporação (ARNOLD et al., 2012). Verifica-se um aumentos maiores

que 45% nas duas sub-bacias, o que favorece a evaporação no solo, diferente do estudo de Dantas et al. (2010) o qual obteve uma redução de 9,75%.

O teor de umidade disponível para as plantas nas camadas do solo (SOL_AWC) é função da capacidade de campo e da fração de água do ponto de murcha permanente (ARNOLD et al., 2012). Essa capacidade foi aumentada em aproximadamente 39% em ambas sub-bacias, já nos estudos de Guimarães (2016), Fukunaga (2012), Kuwajima (2012) e Dantas et al. (2015), esse aumento foi de 13%, 41,8%, 12,69% e 22,95%, respectivamente. Entretanto, Carvalho (2014) e Durães (2010) obtiveram reduções na ordem de 1,30% e 12,29%, respectivamente.

A condutividade hidráulica do solo saturado (SOL_K) mensura a facilidade na qual a água se move pelo solo (ARNOLD et al., 2012), exerce influência nos processos de percolação, fluxo lateral e dinâmica da água subterrânea. A calibração resultou em reduções maiores que 30% para todas as sub-bacias, o que também pode ser observado nos trabalhos de Guimarães (2016), Carvalho (2014) e Kuwajima (2012) que atingiram reduções de 74%, 71% e 97,34%, respectivamente. Ao contrário de Castro (2013) e Fukunaga (2012) que obtiveram aumentos de 50% e 54,4%, respectivamente.

A profundidade do solo (SOL_Z) foi acrescida de 73,21% para a sub-bacia 57 e 58,04% para a sub-bacia 128 após calibração, assim como Dantas et al. (2015) obteve um aumento de 10,15%, ao contrário de Guimarães (2016) e Durães (2010) com reduções de 39% e 18,30%, respectivamente.

A condutividade hidráulica efetiva do canal (CH_K2) controla as perdas de água do canal para o solo. Após calibração o valor de CH_K2 passou de 0 para 21,9 mm/h e 14,9 mm/h para as sub-bacias 57 e 128, respectivamente, houve aumento também nos estudos de Brito (2015), Guimarães (2016), Fukunaga (2012), Pinto (2011), Kuwajima (2012) e Dantas et al. (2015) de 102,1 mm/h, 132,6 mm/h, 35,2 mm/h, 24,1 mm/h, 86,3 mm/h e 3,0 mm/h, respectivamente.

O coeficiente de rugosidade de Manning (CH_N2) aumentou nas duas sub-bacias para valores maiores que os encontrados por Brito (2015), Guimarães (2016) e Dantas et al. (2015) iguais a 0,27 s/m³, 0,16 s/m³ e 0,28 s/m³, respectivamente.

O comprimento da declividade média (SLSUBBSN) reduziu em ambas sub-bacias, diferente de Guimarães (2016) e Dantas et al. (2015) onde houve aumento de 24% e 17,05%, respectivamente.

O coeficiente de retardo do escoamento superficial (SURLAG) controla a fração de toda água disponível que irá abastecer diariamente o canal principal (ARNOLD et al., 2012). Os valores de SURLAG foram reduzidos, Carvalho (2014), Castro (2013) e Pinto (2011) também obtiveram reduções para 2,75 dias, 0,01 dia e 1,325 dias, respectivamente.

A taxa de variação da temperatura com relação à altitude (TLAPS), valores positivos indicam uma elevação na temperatura enquanto valores negativos indicam um decaimento na temperatura com a elevação (ARNOLD et al., 2012). Essa taxa aumentou para 5,73 °C/Km na sub-bacia 57 e 4,24 °C/Km na sub-bacia 128 após calibração.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões do presente trabalho podem ser assim sumarizadas:

- a análise de sensibilidade de parâmetros de calibração do modelo SWAT varia de acordo com os procedimentos adotados, seja em relação ao número de interações e ao tamanho da série histórica de dados monitorados. Dessa forma, é importante a descrição de todo o procedimento envolvido na análise e a comparação dos parâmetros mais sensíveis obtidos com os encontrados em trabalhos realizados próximos ou se possível na mesma região de estudo.
- o SWAT tende a superestimar as vazões médias simuladas, necessitando de calibração. Para melhores resultados na modelagem é importante representar em maior nível de detalhe os dados de entrada com relação à pedologia, ao uso e ocupação do solo, à quantidade de estações climáticas disponíveis, considerando características de solos locais, dados geográficos de maior escala disponível e visitas à campo para verificar a veracidade de dados representados em mapas.
- diferentes testes de calibração variando os parâmetros a serem calibrados, os tamanhos das séries históricas dos dados observados, as estações fluviométricas dentro da bacia hidrográfica e as sub-bacias geraram diferentes resultados mostrando a importância dessas variáveis na modelagem. Nenhum teste de calibração com série histórica longa (29 anos) apresentou resultados satisfatórios. Entre os testes, aquele que empregou todos os parâmetros de calibração para todas as sub-bacias da área de estudo gerou o melhor resultado para ambas estações fluviométricas. Apenas após redução do tamanho da série histórica para 3 anos foi possível obter uma calibração satisfatória considerando o teste do melhor resultado com séries históricas longas. Cabe observar que estudos hidrológicos requerem sólida base de dados, ou seja, quanto maior a série histórica, melhor a representatividade do estudo.
- verifica-se que a calibração é um ajuste fino e que por isso o nível de superestimação dos dados simulados dificulta no processo de calibração, neste caso necessitou reduzir o tamanho da série histórica de dados. As dificuldades da calibração podem estar relacionadas à qualidade dos dados de entrada de uso do solo, pedológicos, climáticos e fluviométricos, à localização de postos pluviométricos com relação a espacialização das chuvas, entre outros. Dessa

forma, destaque-se a necessidade de grande precaução na utilização do modelo SWAT para estimativa de vazões.

São consideradas recomendações para estudos futuros:

- Análise na estimativa de vazões médias a partir de diferentes níveis de detalhamento de dados de entrada de uso e ocupação do solo, pedologia e altimetria;
- Avaliar os mesmos testes de calibração para uma região de estudo menor onde possam ser levantados dados de uso e ocupação do solo em campo, amostra de solos do local, levantamento topográfico e que apresente estação climática e fluviométrica com uma relevante série de dados;
- Utilizar outros modelos para simulação de vazões médias e posterior calibração por questões comparativas;
- Avaliar o processo de calibração de vazões médias estimadas pelo SWAT com outros algoritmos disponíveis pelo SWAT-CUP.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs**. A User Manual. Departament of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 2015.

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 413-430, 2007.

ALMEIDA, A. Q. de; RIBEIRO, A. P. Y. G.; RASCON, N. JR. L.; LIMA, E. P. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 15, n. 4, p. 354–358, 2011.

ANDRADE, M. A. ; MELLO, C.R. ; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)**, v. 17, p. 69-76, 2013.

ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, J. M., SRINIVASAN, R., SANTHI, C., HARMEL, R. D., VAN GRIESVEN, A., VAN LIEW, M. W., KANNAN, N., KA, M., K. SWAT: Model Use, Calibration and Validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55 n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R.; BERNHARDT, G. Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. **Ground Water**, v. 33, n. 6, p. 1010-1018, 1995.

BALDISSERA, G. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. 148 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá - MT.

BARBAROTTO JUNIOR, J. L. **Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis**. 2014. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D.; TUCCI, C. E. M.; KELMAN, J.; BRAGA Jr., B. P. F. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: NOBEL, ABRH, 1987.

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta**. [S.l.]: Forrex, 2009.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York. **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 10, n. 10, p. 363-374, 2005.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2014. p. 177-241.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: The Primir**. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltda, 2001.

BONUMÁ, N. B., REICHERT, J. M., MINELLA, J. P., BARROS, C. A. P., RODRIGUES, M. F., BUARQUE, D. C. 2010. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Brasília, Distrito Federal. Brasil.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America**, v. 46, p. 438- 441, 1982.

BRITO, E. **Estimativa da produção de sedimentos da bacia do rio Santa Maria da Vitória – Espírito Santo através do modelo matemático *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT)**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, na área de Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES.

CARVALHO, F. H. de. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília - DF.

CASTRO, K. B. de. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências Aplicadas (Geoprocessamento e Análise Ambiental) da Universidade de Brasília, Brasília - DF.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre - RS, v. 8, n. 3, p.27-39, 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Drenagem urbana – Manual de projeto**. 3. ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.

DANTAS, J. C.; SILVA, M. A da.; SILVA, R. M da.; VIANNA, P. C. G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. **Revista Geociências**, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS (DEG). **Hidrologia de Superfície: escoamento superficial**. Lavras. Disponível em: <http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/Hidrologia%20l/escoamentosuperficial.pdf>. Acesso em: 27 set. 2015.

DIAS JUNIOR, M. S.; BERTONI, J. C.; BASTOS, A. R. R. **Curso de pós-graduação em solos e nutrição de plantas**. Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências do Solo - Setor de Física do Solo, Lavras.

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do Rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. de; NAGHETTINI, M. Applicability of the swat model for hydrologic simulation in Paraopeba River basin, MG. **CERNE**, Lavras - MG, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Espírito Santo**. 1978. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/335800/levantamento-de-reconhecimento-dos-solos-do-estado-do-espirito-santo>>. Acesso em: 8 ago. 2016.

FREITAS, E. D. **Notas da aula da disciplina ACA-0429 Agrometeorologia**. Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísica – Departamento de Ciências, São Paulo, 2005.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**. v. 50, p. 1211-1250, 2007.

GERITS, J. J. P., LIMA, J. L. M. P., BROEK, T. M. W. V. D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M. G. **Process Studies in Hillslope Hydrology**. 1 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1990, p. 539.

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.1174-1184, 2013.

GUIMARÃES, C. F. **Simulação hidrológica e hidrossedimentológica em uma bacia com reservatórios com o modelo *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT)**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental, na área de Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES.

GUPTA, H. V. S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of hydrologic engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HANSEN, B., SCHJONNING, P., SIBBESEN, E. Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. **Soil and Tillage Research**. v.52, p.103-111, 1999.

HASSUDA, S. **Modelagem matemática: elaboração do modelo conceitual. Informática em Águas Subterrâneas**. Informativo da Sociedade Brasileira de Águas Subterrâneas, n. 10, p. 2-3, 2000.

HOMMA, T.; SALTELLI, A. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 52, p. 1-17, 1996.

HORTON R. E. **Surface Runoff Phenomena. Part 1: Analysis of the Hydrograph**. Edward Bros: Ann Arbor - MI, 1939.

KAMPF, S. K.; BURGESS, S. J. A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. **Water Resources Research**, v. 43, 2007.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KUWAJIMA, J. I. **Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

LATUF, M. de O. **Mudanças no uso do solo e comportamento hidrológico nas bacias do Rio Preto e Ribeirão entre Ribeiros**. 2007. 103 f. Dissertação (*Magister Scientiae*) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2007.

LELIS, T. A. ; CALIJURI, M. L. ; SANTIAGO, A. da F. ; LIMA, D. C. de ; ROCHA, E. de O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**. v. 36, p. 623-634, 2012.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LIMA, J. L. M. P.; SINGH, V. P. The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. **Advances in Water Resources**. v.25, p. 817-828, 2002.

LINO, J. F. L., CORSEUIL, C. W., KOBAYAMA, M., MALUTTA, S., UDA, K., BORTOLOTO, N. L., SANTOS, I. 2009. Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Brasil.

LIU, S. Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and splash pine uplands in North-Central Florida. **Journal of Hydrology**, n. 207, p. 32-41, 1998.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba - SP.

MAIDMENT, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Ed.). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University, 1993. p. 147-167.

MALUTTA, S. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do rio Negrinho - SC com o modelo SWAT**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC.

MAMO, M., BUBENZER, G. D. Detachment arte, soil erodibility, and soil strength as influence by living plant roots. Part II: field study. **Transactions of the ASABE**, v. 44, n. 5, p.1175-1181, 2001.

MELO NETO, J. de O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.

MENZIANI, M., PUGNAGHI, S., PILAN, L., SANTANGELO, R., VINCENZI, S. TDR Soil moisture measurements at the Lago Maggiore MAP target area: preliminary results. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, n. 5-6, p. 431-436, 2001.

MINGOTI, R. **Produção de Sedimentos em Microbacias Hidrográficas em Função do Relevo e da Cobertura Florestal**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Piracicaba - SP.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p 885-900, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**. v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool - Theoretical Documentation**: Version 2009. Temple: Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, 2011. 647p.

OGDEN, F.J. **CASC2D Reference manual**. Department of Civil and Environmental Engineering/University of Connecticut. 83p. 1998.

PERAZZOLI, M; PINHEIRO, A; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso e ocupação do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia - SC. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 37, n. 5, p. 859–869, 2013.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Evapo(transpi)ração. In:_____. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba: FEALQ, 2007.

PEREIRA, D. dos R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. 2013. 126 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa - MG.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI, A. J.; FERNANDES, E. N. e LIMA, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúma, EMBRAPA/CNPMA, 1997. 83 p.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Lavras - MG.

PRADO, H. do. **Pedologia Fácil**. 4 ed. Piracicaba: Hélio do Prado, 2013.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 1 ed. Barueri, SP: Manole, 2004.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. São José dos Campos: INPE, 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2016.

RODRIGUES, E. L. Impact of changes in land use in the flow of the Pará River Basin, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 19, n. 1, p. 70-76, 2015.

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau**. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília - DF.

SARMENTO, L. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**. 2010. 241 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília - DF.

SILVEIRA, A. L. da. Ciclo Hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2014. p. 35-52.

SILVEIRA, A. L. da; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2014. p. 335-372.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). Section 4: Hydrology. In: _____. **National Engineering Handbook**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Soil mechanics level I**. Module 3 - USDA Textural Soil Classification. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1987.

SOIL CONSERVATION SERVICE ENGINEERING DIVISION (SCS). **Urban hydrology for small watersheds**. 2 ed. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC: Technical Release 55, 1986.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, v. 30, n. 3, p. 453-462, 1994.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington - D.C, p. 686-693, 1944.

TUCCI, C. E. M. Interceptação. In: _____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2014. p. 243-252.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade; UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**. Brasília: Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002. Disponível em: <<http://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/6/23336/InBr02902.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2016.

TUCCI, C. E. M., BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2014. p. 253-287.

VAN GRIENSVEN, A. **Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005**. Unpublished report. 2005. 48p.

VAN GRIENSVEN, A; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 10-23, 2006.

VEITH, T.L. and L.T. Ghebremichael. 2009. How to: applying and interpreting the SWAT Auto-calibration tools. In: Fifth International SWAT Conference Proceedings. August 5-7, 2009 (Proceedings).

WANDERLEY, R. M. **Modelo advectivo-dispersivo de transporte de solutos em solo não saturado utilizando os métodos das características e dos elementos**

finitos. 2000. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Brasília, Brasília.

WARD, A. D.; TRIMBLE, S. W. **Environmental Hydrology**. 2 ed. USA: Lewis Publishers, 2004.

WILLIAMS, J.R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. **Transactions of the ASABE**, v. 12, n. 1, p. 100-103, 1969.